

**Martin S. Fischer, Stanislav N. Gorb,
Andreas Karguth, Jörg Mämpel & Hartmut Witte**

InspiRat

Biologisch inspirierter Kletterroboter für die externe
Inspektion linearer Strukturen

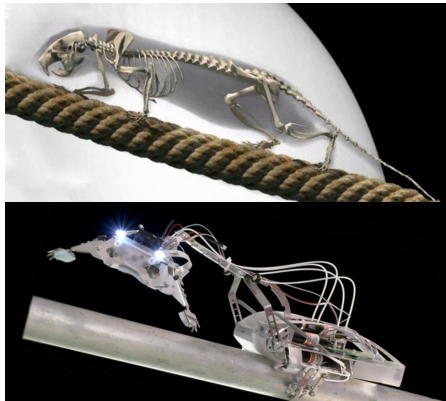
Berichte aus der Biomechatronik

Herausgegeben von Prof. Dr. Hartmut Witte
Fachgebiet Biomechatronik an der TU Ilmenau

Band 8

InspiRat

Biologisch inspirierter Kletterroboter für die
externe Inspektion linearer Strukturen



Martin S. Fischer, Stanislav N. Gorb, Andreas Karguth,
Jörg Mämpel & Hartmut Witte



Universitätsverlag Ilmenau
2014

Impressum

Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek

Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Angaben sind im Internet über <http://dnb.d-nb.de> abrufbar.

Redaktion:

- Dr. Jörg Mämpel** Technische Universität Ilmenau, Fakultät für Maschinenbau, Fachgebiet Biomechatronik und TETRA Gesellschaft für Sensorik, Robotik und Automation mbH Ilmenau
- Dipl.-Biol. Danja Voges** Technische Universität Ilmenau, Fakultät für Maschinenbau, Fachgebiet Biomechatronik

Technische Universität Ilmenau/Universitätsbibliothek

Universitätsverlag Ilmenau

Postfach 10 05 65

98684 Ilmenau

www.tu-ilmenau.de/universitaetsverlag

Herstellung und Auslieferung

Verlagshaus Monsenstein und Vannerdat OHG

Am Hawerkamp 31

48155 Münster

www.mv-verlag.de

ISSN 1865-9136 (Druckausgabe)

ISBN 978-3-86360-052-5 (Druckausgabe)

URN urn:nbn:de:gbv:ilm1-2014100033

Coverfoto: Dipl.-Biol. Helga Schulze | Bochum

Projektleitung:

Prof. Dr. Hartmut Witte

Technische Universität Ilmenau, Fakultät für
Maschinenbau, Fachgebiet Biomechatronik

Projektpartner:

Prof. Dr. Martin S. Fischer

Friedrich-Schiller-Universität Jena, Institut für
Spezielle Zoologie und Evolutionsbiologie mit
Phyletischem Museum

Prof. Dr. Stanislav N. Gorb

Christian-Albrechts-Universität Kiel, Zoologisches
Institut, Funktionelle Morphologie und Biomechanik

Dr. Andreas Karguth

TETRA Gesellschaft für Sensorik, Robotik und
Automation mbH Ilmenau

Das Projekt **InspiRat** wurde gefördert durch:

DLR (Projektträger), **Förderkennzeichen:** 01RI0633

Projektlaufzeit: 1. Oktober 2006 - 30. Juni 2011

Inhaltsverzeichnis

1.	Kurzdarstellung des Projektes	11
1.1	Aufgabenstellung (STAND 2006)	11
1.2	Voraussetzungen für das Projekt (STAND 2006)	12
1.3	Planung und Ablauf des Vorhabens	13
1.4	Ausgangssituation für das Projekt (STAND 2006)	15
1.4.1	Stand der Technik in der Kletterrobotik	15
1.4.2	Industrieller Standard	16
1.4.3	Vorarbeiten in der biomechanischen Analyse	16
1.4.4	Stand der Technik bei Haft- und Greifmechanismen	17
1.5	Zusammenarbeit mit anderen Stellen	18
2.	Ausführliche Projektdarstellung	21
2.1	Erzieltes Ergebnis	21
2.1.1	Untersuchung des Kletterns	21
2.1.2	Mechanismen zur Fortbewegung auf schmalen Substraten	30
2.1.3	Mechanismen zur Fortbewegung auf geneigten Substraten	40
2.1.4	Energiebetrachtung und invers-dynamische Analyse	43
2.1.5	Entwicklung, Realisation, Optimierung und Dokumentation technischer Kontaktmechanismen	74
2.1.6	Katalog für adhäsive Kontaktmechanismen	89
2.1.7	Entwicklungsprozess des Kletterroboters „RatNic“	90
2.1.8	Entwicklung eines modularen Kletterrobotersystems CREST	104
2.1.9	Applikation von adhäsiven Strukturen auf Kletterrobotern	111

2.2	Verwertbarkeit	120
2.2.1	Industrielle Verwertung (TETRA)	120
2.2.2	Verwertung der Ergebnisse (FG Biomechatronik)	122
2.2.3	Verwertung der Hochgeschwindigkeits-Röntgenvideo-graphieanlage (FSU Jena)	124
2.2.4	Verwertung Kontaktmechanismen (CAU Kiel)	127
2.2.5	Wissenschaftliche und/oder technische Erfolgsaussichten	128
2.2.6	Wissenschaftliche und wirtschaftliche Anschlussfähigkeit	128
2.3	Fortschritte anderer Stellen auf dem Gebiet des Projektes	129
2.3.1	Fortschritt aus industrieller Sicht	129
2.3.2	Entwicklungen im Bereich der Kletterrobotik	129

Publikationen **139**

Wissenschaftliche Publikationen	139
Sekundärliteratur (Auswahl) / Öffentlichkeitsarbeit	149
Zeitschriftenartikel außerhalb von Fachzeitschriften	151
Teilnahme an Konferenzen und anderen Veranstaltungen	153
Eingeladene Vorträge	158
Veranstaltungen mit materieller und personeller Beteiligung	162

Projektbeteiligte Wissenschaftler **165**

Vorwort

Auf der Konferenz „Bionik 2006 – Innovationsmotor Natur“ warfen nach einem beeindruckenden Plenarvortrag von Martin Bühler (damals Entwicklungsleiter bei Boston Dynamics Inc.) über die Entwicklung der vierbeinigen Laufmaschine Big Dog die anwesenden Vertreter des BMBF die Frage auf, warum Deutschland – weltweit führend in der Bionik – auf dem Gebiet der biologisch inspirierten Robotik nichts den Entwicklungen in den USA Vergleichbares vorzuzeigen habe. Die Antwort der Fachleute war simpel: in den USA förderte die DARPA (der zivile Zweig des Pentagon) die Bio-Robotik seit etwa der Jahrtausendwende massiv, während in Deutschland trotz führender Position in der biologischen Lokomotionsforschung und damit optimaler Ausgangslage für die Bio-Robotik keine systematische Förderung existierte.

Im Modellprojekt InspiRat mit einem mittelständischen Unternehmen und drei universitären Lehrstühlen und konnte 2006 – 2011 gezeigt werden, dass bei adäquater wissenschaftlicher Unterstützung auch die deutsche Industrie durchaus in der Lage ist, Bio-Roboter auf international konkurrenzfähigem Niveau zu entwickeln.

Das Akronym InspiRat und die Benennung der im Projekt entstandenen Roboterfamilie als RatNics beschreiben den erzielten Fortschritt assoziativ: die wissenschaftliche Analyse des Kletterns von Ratten und anderen Wirbeltieren erlaubte den Bau einer neuen Klasse von Kletterrobotern. Waren zu Beginn der Entwicklung integrierte Kletterroboter mit Massen > 35 kg Stand der Technik, stehen als Ergebnis des Projektes nunmehr Maschinen (integriert und modular) mit Massen von 1 kg bis 2 kg zur Verfügung, experimentell modulare Systeme mit Massen von ca. 250 g. Nebenergebnis ist die Neudefinition des Standes der Technik in der Röntgenvideographie zusammen mit der Siemens® AG: biplanar 2.000 Röntgenbilder pro Sekunde, weltweit die höchste Auflösung bei hochfrequenten Röntgenbildern.

Die Ergebnisse der universitären Studien wurden und werden gemäß den Gepflogenheiten der Wissenschaft publiziert, doch belegt die Nachfrage nach dem Abschlussbericht für das BMBF das Interesse an einer übergreifenden, transdisziplinären Darstellung des bionischen Entwicklungsprozesses.

Wir haben uns deshalb entschieden, diesen Abschlussbericht nur geringfügig redaktionell überarbeitet zu publizieren. Er beschreibt somit den wissenschaftlichen Stand 2011 in einer auf den Fördermittelgeber zugeschnittenen Darstellungsweise. Natürlich ist die Wissenschaft nicht stehen geblieben, und insbesondere die im Umfeld des Projektes promovierten Mitarbeiter der Projektgruppe (Drs. E. Andrada, K. Carl, O.E.

Jimenez-Lopez, C. Krause, J. Mämpel, A. Schmidt, D. Voigt) haben Teilaspekte fortgeschrieben – wir haben versucht, die Nachverfolgung durch Angabe einiger Publikationen aus der Zeit nach Projektende (2011 bis 2013) zu erleichtern. Doch ist unser Anspruch nicht prospektiv wie bei Zeitschriftenpublikationen, wir wollen retrospektiv (ABSCHLUSSbericht) die Möglichkeit der Analyse eines erfolgreich abgeschlossenen Prozesses ermöglichen.

1. Kurzdarstellung des Projektes

1.1 Aufgabenstellung (STAND 2006)

Gemeinsames Ziel der Antragsteller war als Arbeitsbasis ein grundlegendes **Verständnis des quadrupeden Kletterns** für die **Umsetzung der Ergebnisse** in einen **biologisch inspirierten Kletterroboter**. Erstmals sollte unter Anwendung verschiedener Analysetechniken eine systematische Untersuchung des Kletterns unter kinematischen und dynamischen Aspekten erfolgen.

Technisches Ziel des Verbundprojektes war die **Entwicklung eines kleinen bis mittelgroßen Kletterroboters** nach dem Vorbild kletternder vierbeiniger Wirbeltiere. Die Maschine sollte folgenden Anforderungen genügen:

- **Kletterfähigkeit** auf Substraten mit variablen Durchmessern (Leitungen, Masten, Seilen)
- **Autonome** Bewegungsfähigkeit (eigene Energieversorgung, lokale, regionale und zentrale Intelligenz)
- **Kabellose** Steuerbarkeit und Datenaustausch (zentrale Intelligenz)
- **Nutzlasttragfähigkeit** zur Aufnahme von Sensoren (z.B. Kamera und Beleuchtung; Thermosensoren, Chemo-Sensoren etc.), welche Informationen aus der zumeist technischen Umwelt aufnehmen und drahtlos weiterleiten
- **Zugkraft** für das Nachziehen von leichten Hilfsseilen
- Spätere **Erweiterungsfähigkeit** zur Plattform für manipulative Fähigkeiten

Mit dem Projekt „InspiRat“ sollte der **Nachweis der Einsetzbarkeit** von Kletterrobotern nach dem Vorbild eines kleinen Wirbeltiers erbracht werden. Diese Szenarien zielen insbesondere auf Einsatzbereiche, die für eine Inspektion durch den Menschen nicht oder nur schwer zugänglich sind (enge Kabel- und Rohrleitungsschächte in hochtechnisierten Gebäuden und Anlagen und in baulichen Altbeständen, kontaminierte Bereiche).

Während der Kletterroboter-Entwicklung wurde verstärkt auf die Methode der Bionik gesetzt – der technischen Entwicklung liegt das grundsätzliche Verständnis

biologischer Systeme und Prozesse zugrunde. Für das Klettern als Fortbewegung lassen sich zwei Betrachtungsschwerpunkte setzen: die **Biomechanik des Bewegungsapparates** und der **Substratkontakt** vergleichbarer Tiere. Auf Seite der technischen Biologie sollte das Projekt dazu dienen, ein Verständnis in diesen beiden Bereichen zu erarbeiten bzw. zu vertiefen. Insbesondere den Anforderungen nach „engen“ Bewegungsräumen versprechen bionisch inspirierte vierbeinige Maschinen besonders gut zu genügen. Oligopedale Maschinen (bis zu vier Beine) besitzen bessere Strukturbelastungskoeffizienten als polypedale Maschinen, das Verhältnis Nutzlast zu Eigengewicht ist höher. Vierbeinige **Vorbilder für diese Maschinen** lassen sich für die Kletterrobotik in drei Gruppen aufteilen:

- Krallenkletterer (Ratte, Katze)
- Greifkletterer (Primaten, Chamäleon)
- Haftkletterer (Klippschliefer, Gecko)

Für die Biomechanik ist es notwendig, die Kinematik des Kletterns zu verstehen. Hierfür wurde im Rahmen des Projekts die weltweit schnellste Röntgen-Kinematographie-Anlage aufgebaut und in Betrieb genommen. Durch die biplanare Anlage ist es möglich die Kinematik räumlich aufzulösen. Durch die Ergänzung um ein Messsystem für die Substratkontaktkräfte lässt sich die Dynamik des Kletterns untersuchen. Das entsprechende Messsystem wurde ebenfalls im Rahmen des Projekts entwickelt. Gleichzeitig wurde die Methode der invers-dynamischen Analyse (IDA) für die Untersuchung angepasst bzw. weiterentwickelt.

1.2 Voraussetzungen für das Projekt (STAND 2006)

Die Antragsteller sind in den entscheidenden Abschnitten der Entwicklungskette jeweils international ausgewiesen, sie haben alle in wechselnden bi- und trilateralen Konstellationen bereits erfolgreich Projekte durchgeführt. Es ist ungewöhnlich, dass alle Antragsteller bei einem derart breiten Spektrum fachlicher Aktivitäten als Ausgangsbasis eines neuen Projektes auf teils mehr als ein Jahrzehnt stabiler und erfolgreicher Kooperationen aufbauen können. Die Antragsteller Fischer und Witte haben in den letzten 15 Jahren gemeinsam wesentlich zur Entschlüsselung der Prinzipien vierbeiniger Fortbewegung beigetragen, die Kooperation Zoologie - Biomechatronik ist etabliert. Der Auftragnehmer Prof. Dr. Gorb hat seine Expertise zu Mikrohaft- und -greifmechanismen in Teilvorhaben 3 des Verbundprojekts InspiRat eingebracht.

Seine langjährig interdisziplinäre Arbeitsweise resultiert in einer innovativen effizienten Forschungs- und Entwicklungsarbeit. Themenschwerpunkte und Kernkompetenzen liegen in

- der Zoologie und Evolutionsbiologie (vergleichende Untersuchungen der funktionellen Oberflächen bei Tieren),
- der biologischen Mikro- und Nanotribologie (Reibung und Adhäsion der Oberflächen) und
- der Entwicklung künstlicher Oberflächen mit definierten tribologischen Eigenschaften.

Seit seiner gemeinsamen Forschungszeit mit den Antragstellern Fischer und Witte in Jena besteht eine Vielzahl an Forschungskontakten, unterstützt durch die gemeinsame Mitgliedschaft im BioKoN e.V.

Die Firma Tetra GmbH ist eine Technologiefirma in Ilmenau, mit der die Antragsteller Gorb, Fischer und Witte jeweils bereits erfolgreich zusammengearbeitet haben. Das Fachgebiet Biomechatronik der TU Ilmenau betreute von 2003 bis 2010 für das vom Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) initiierte Bionikkompetenznetzwerk BioKoN e. V. die Fachgruppe B5: „Robotik, Biomedizintechnik und Bionik der Mikrosysteme“.

1.3 Planung und Ablauf des Vorhabens

Die Entwicklungsarbeiten wurden in Abstimmung der Projektpartner ausführlich und umfassend geplant. Diese Planung war auch die Voraussetzung, dass es bei der Entwicklung von Teillösungen und der Demonstratoren nicht zu zeitlichen Verzögerungen kam.

Die Projektzwischenstände wurden in regelmäßigen Gesamt-Projekttreffen abgestimmt. Noch wichtiger waren die bilateralen Abgleiche zu den Arbeitsständen an der TU Ilmenau und die Formulierungen von Fragestellungen zur Biologie des Kletterns und zu den Haftmechanismen an die Biologen (FSU Jena, CAU Kiel).

Das Vorhaben war entsprechend der Kompetenz der Partner und der Projektziele in vier Teilvorhaben unterteilt:

Teilvorhaben 1: Analyse der Biomechanik des Kletterns

Teilvorhaben 2: Synthese von Kletterrobotern

Teilvorhaben 3: Analyse des Substratkontakts

Teilvorhaben 4: Bionische Betrachtung des Kletterns

Arbeitspakete für Teilvorhaben 1 (Analyse der Biomechanik des Kletterns) bestanden in:

- der Vorbereitung Tierexperimente, insb. Habituation der Tiere,
- der Inbetriebnahme der Röntgenanlage,
- der Entwicklung des Kraftmesssystems,
- der Durchführung der Tierexperimente und
- der Auswertung der Kinematik.

Arbeitspakete für Teilvorhaben 2 (Synthese der Kletterroboter) bestanden in:

- der Erstellung Lastenheft, Parameterfestlegung und Komponentenauswahl,
- der Konstruktion der Komponenten,
- dem Bau und Funktionstest der Demonstratoren und des Testfeldes,
- dem Test der Demonstratoren und
- der technischen Dokumentation.

Arbeitspakete für Teilvorhaben 3 (Analyse des Substratkontakts) bestanden in:

- der Identifikation der Kontaktmechanismen,
- der Entwicklung technischer Kontaktmechanismen,
- der Realisation technischer Kontaktmechanismen,
- der Optimierung technischer Kontaktmechanismen,
- der Dokumentation technischer Kontaktmechanismen und
- dem Ausarbeiten eines Katalogs für adhäsive Kontaktmechanismen.

Arbeitspakete für Teilvorhaben 4 (Bionik des Kletterns) bestanden in:

- der invers-dynamischen Analyse,
- der Entwicklung einer modularen Testplattform und
- der Applikation adhäsiver Strukturen auf Kletterrobotern.

1.4 Ausgangssituation für das Projekt (STAND 2006)

1.4.1 Stand der Technik in der Kletterrobotik

Im Bereich der „Climbing robots“ gab es zu Projektstart verschiedene Forschungsschwerpunkte. Die Kletterroboter besaßen die Fähigkeit, sich auf glatten und ebenen Substraten zu bewegen. Hierzu sind Beispiele der Roboter „Sky Cleaner“ der Universität Hamburg und die Roboterplattform „Sirius“ am Fraunhofer IFF Magdeburg. Hier wurde die Haftung auf Glasflächen über Saugnäpfe erzeugt. Dafür war immer eine Pneumatikanlage nötig, welche zwar gleichzeitig für die Antriebe verwendet wurde, aber gleichzeitig immer einen hohen, ineffizienten Leistungsbedarf bedeutet. Eine autonome Energieversorgung ist hier nur schwer möglich.

Die Gruppe um S. Rock der Stanford University (<http://sun-valley.stanford.edu/>) beschäftigte sich mit dem Problem der Bewegungsplanung beim Klettern. Untersucht wurden zum einen Möglichkeiten der Bahnplanung und Zielorientierung, zum anderen Möglichkeiten der Erfassung des Kontaktes zum Substrat. Probleme wie das Haften und Greifen wurden bis dato nicht betrachtet. Ein Service-Roboter mit Extremitäten für die Anwendung in kontaminierten Bereichen wurde der Gruppe um B.D. LUK von der City University of Hong Kong entwickelt. Der Einsatz von Saugmechanismen zum Halten des Substratkontaktes schränkt auch hier den Einsatzbereich ein.

Als Unternehmen beschäftigte sich zu Projektstart „Boston Dynamics“ mit der Entwicklung von Kletterrobotern. Finanziell unterstützt wurde (und wird) sie dabei von der DARPA. Der Fokus lag bei der Fortbewegung auf senkrechten Substraten mittels Krallen. Die Verwendung von Haftpads zum Halten des Substratkontaktes wurde zu Projektstart von wenigen Forschergruppen untersucht. Ob man nun Ketten als Antriebselemente verwendete oder wie beim „MechoGecko“ bein-ähnliche Konstruktionen wie die Whegs – das Verlassen des ebenen Substrats war nicht realisiert. Dass schon eine erstaunliche Leistungsfähigkeit bei der trockenen Adhäsion erreicht

wurde, zeigte Sangbae mit dem Stickybot. Die Integration von „compliant mechanisms“ und die Realisierung einer richtungsabhängigen Adhäsion waren dabei ein entscheidender Punkt in der Funktionsstruktur der Maschine (<http://www.stanford.edu/~sangbae/Stickybot.htm>). Die Integration der verschiedenen Aspekte der Kletterrobotik in Kombination mit den technisch-biologischen Erkenntnissen aus der Bewegungsanalyse biologischer Kletterer sollten einen autonom kletternden Roboter möglich machen. Die Strategie des Verklammerns zum Erzeugen der Haltekräfte und –momente wurde noch nicht realisiert.

1.4.2 Industrieller Standard

Die TETRA GmbH war bereits Marktführer im Bereich Mikrosensorik und Präzisionsantriebssysteme, erschloss aber ebenfalls als eines der ersten Unternehmen bionisch inspirierte nachgiebige Mechanismen für die industrielle Robotik.

Bisherige F&E-Förderung der TETRA GmbH fand im Rahmen von Verbundprojekten (Land, Bund und EU) zu den Themenschwerpunkten Mikrosensorik und Präzisionsantriebssysteme statt. Diese Förderungen mündeten in die Produktion der BASALT-Gerätefamilie. Hierbei handelt es sich um mittlerweile erfolgreich vermarktete Geräte zur Analyse von mechanischen Eigenschaften im Mikrobereich. TETRA ist Technologiepartner für die Entwicklung von Experimentierplattformen des biologisch inspirierten Laufens an der FSU Jena, Laulabor Dr. Seyfarth (jetzt TU Darmstadt).

Für die Anwendung im industriellen Umfeld, für den wissenschaftlichen Gerätebau und die Labortechnik bietet TETRA hochgenaue Antriebssysteme mit unterschiedlichen Wirkprinzipien an. Für die Ansteuerung der Antriebe stehen unterschiedliche Steuerungen zur Verfügung. TETRA entwickelt und fertigt Anlagen und Komponenten für die Präzisionsautomatisierung. Dazu gehören beinhaltet sowohl die µm-genaue Positionierung von Bauelementen als auch die Entwicklung von prozessspezifischen Spezielsenoren sowie die Anwendung von Bildverarbeitungssystemen. Einsatzbereiche sind die Elektrotechnik / Elektronik, die Sensortechnik und die Forschungstechnik.

1.4.3 Vorarbeiten in der biomechanischen Analyse

Der Antragsteller Fischer hat inzwischen 22jährige Erfahrungen mit Röntgenkine-matographie und videographie. Von 1989 bis 2002 haben Fischer und Mitarbeiter am damaligen Institut für den Wissenschaftlichen Film (IWF) in Göttingen in vielen

Studien die vierbeinige Lokomotion überwiegend von Säugetieren untersucht (s. Anlage). Die Limitierungen dieser Philips®-Röntgenanlage aus den 70er Jahren waren neben der zunehmenden Überalterung die niedrige Aufnahme Frequenz (max. 150 Bilder/s) und die Querabmessung des Strahlenganges von maximal 22 cm. Die Anlage wurde 2002 verschrottet. Seit 15 Jahren (Stand Bericht 2011) arbeitet die jenenser Gruppe mit hochfrequenten Videosystemen (Mikromak® CamSys®) und seit 13 Jahren mit Qualisys®, einem auf Oberflächenmarkern basierenden Verfahren mit Infrarotreflektoren und einer Aufnahme Frequenz von bis zu 1.000 Frames/sec.

Grundsätzlich kann man sagen, dass die Analyse des Kletterns kleiner bis mittelgroßer Säugetiere ohne Röntgenvideographie nicht durchführbar ist, sie aber die wichtigste Voraussetzung für die Entschlüsselung der kinematischen und dynamischen Prinzipien des Kletterns ist. Bei kleinen Säugetieren von bis zu etwa 1 kg Körpermasse, einem zentralen Untersuchungsgegenstand (da ja auch „Inspirat“ möglichst klein sein soll), sind eigentlich nur die distalen Gliedmaßenabschnitte äußerlich sichtbar. Da auch international bis zu Projektstart keine ausreichende Analysetechnik in Anwendung war, gab es keinerlei belastbare Daten zur Biomechanik des Kletterns für kleine Säuger.

Der Antragsteller Witte hat während seiner Tätigkeiten in medizinischen und biologischen Instituten eine Vielzahl von Arbeiten zur Funktionellen Morphologie der terrestrischen Lokomotion (insbesondere die Wechselwirkung von Gestalt und Fortbewegung bei vierbeinigen Säugetieren und beim Menschen betreffend) veröffentlicht, welche biologische Inspiration für Laufmaschinen wie BISAM, TEKKE, LITLED, BIG-DOG, RISE, JOHNNIE lieferten.

1.4.4 Stand der Technik bei Haft- und Greifmechanismen

Bisherige Kletterroboter waren für die Inspektion und Reinigung glatter Wände (Fensterscheiben, Beton- oder Stahlflächen) mit Saugnäpfen ausgelegt. Demzufolge konzentrierten sich auch bisherige Forschungsarbeiten zu notwendigen Roboterhaftmechanismen auf Strukturen, welche an ebene und glatte Flächen angepasst sind. Greifsysteme für gekrümmte und raue Substrate blieben weitgehend unbeachtet und sollten im Verbundvorhaben „Inspirat“ eingehend betrachtet werden. Hierfür bieten biologische Greifmechanismen hervorragende Vorbilder, was das erfolgreiche Überleben von beispielsweise Heuschrecken oder Chamäleons zeigt. Die Oberflächenstruktur solcher Greifmechanismen ist in der Literatur beschrieben und lässt auf eine enorme Vielfalt von Mikrostrukturen schließen (z. B. GORB 2001, SCHERGE

& GORB 2001). Hinsichtlich ihrer Funktion und Materialeigenschaften fehlen weitgehend experimentelle Nachweise. Doch zweifelsfrei sind funktionelle Lösungen in verschiedenen Gruppen unabhängig voneinander entstanden und viele Tierarten sind mit unterschiedlichen Strukturen ausgestattet, deren artspezifische Morphologie für die Erhöhung der Reibungskräfte besonders geeignet ist. Anpassungen an Habitate und Lebensweisen gelten als Einflussfaktoren auf die Ausprägung von Reibungssystemen in jeder bestimmten Art. Acht Grundklassen von Bauprinzipien biologischer Haft- und Verklammerungssysteme sind bekannt: Haken, Verschluss, Klemme, Spreiße, Saugnapf, Expansionsanker, haftende Sekretionen (Klebstoff) und Reibung (Gorb 2006). Außerdem treten Kombinationen dieser Prinzipien auf. Nicht zu unterschätzen ist die Einbindung der mikroskopischen Kontaktmechanismen in kinematische (makroskopische) Abläufe.

Mithilfe unterschiedlicher Typen von Mikro- und Nanostrukturen wird Reibung zwischen zwei Oberflächen erhöht und führt zur Fixierung oder Bewegungseinschränkung. Einige Reibungssysteme und ihre Funktionen wurden in der Literatur beschrieben, aber mechanisch-materiell experimentell sind sie kaum untersucht. Zu Projektstart verfügbare Ergebnisse ließen vermuten, dass die Oberfläche eines biologischen Reibungssystems aus besonderen Mikrostrukturen und entsprechenden mechanischen Eigenschaften kombiniert ist.

1.5 Zusammenarbeit mit anderen Stellen

Das Projekt „InspiRat“ ist unter Mithilfe durch die vom Antragsteller Witte geleitete Fachgruppe B5 „Biomechatronik, Biomedizintechnik, Mikrosystemtechnik, Aktuatorik, Robotik“ des BMBF-geförderten Bionik-Kompetenz-Netzes „BioKoN“ entstanden (Ilmenau ist Netzknoten für Robotik, Bionik in der Medizintechnik, Bionik der Mikrosysteme) und hat vielfältige Rückwirkungen auf die Netzwerkarbeit. Auf dieser Ebene fand auch eine stetige wissenschaftliche Diskussion des Projekts statt.

Die Projektpartner arbeiteten auf der Grundlage eines Kooperationsvertrages bei der Projektbearbeitung zusammen. Es erfolgten regelmäßige Absprachen und Rückkopplungen zwischen den Projektpartnern, welche zu den in diesem Bericht separat dargestellten Ergebnissen entscheidend beigetragen haben.

An das am Max-Planck-Institut für Metallforschung durchgeführte Teilvorhaben knüpften die Arbeiten an der Christian-Albrechts-Universität im Erweiterungsprojekt InspiRat an, weil Dr. Stanislav Gorb einem Ruf auf die Professor für Funktionelle Morphologie und Biomechanik an das Zoologische Institut der CAU Kiel gefolgt ist und das Erweiterungsprojekt InspiRat dort etabliert hat.

2. Ausführliche Projektdarstellung

2.1 Erzieltes Ergebnis

Ergebnis des Projekts ist die Entwicklung unterschiedlicher Kletterroboter unter Nutzung biologischen und biomechanischen Wissens und dessen Erarbeitung. Ein weiteres technisches Ergebnis des geförderten Vorhabens ist die Einrichtung der Infrastruktur einer Hochgeschwindigkeits-Röntgenvideographieanlage (siehe Kap. 2.1.1.), die sowohl für Projekte am Institut für Spezielle Zoologie und Evolutionsbiologie ständig im Einsatz ist als auch seit Projektende von Kooperationspartnern aus dem In- und Ausland intensiv genutzt wird.

Im Rahmen der Untersuchungen des Kletterns bei Chamäleons, Ratten und Faultieren entstanden außerdem dreidimensionale Animationen von bewegten Skeletten, die die arboreale Fortbewegung dieser Tiere veranschaulichen (siehe Abbildungen 12 und 13). Diese Animationen waren eine Kooperation mit Jonas Lauströer und Amir Andikfar von der Hochschule für angewandte Wissenschaften Hamburg und wurden von der Siemens® AG finanziell gefördert.

2.1.1 Untersuchung des Kletterns

Hochgeschwindigkeits-Röntgenvideographieanlage

Die biplanare Hochgeschwindigkeits-Röntgenvideographieanlage (Neurostar®, Siemens® AG) besteht aus zwei Strahlenquellen und zwei zugehörigen Bildverstärkern (Durchmesser: 40 cm), die an zwei C-Bögen befestigt sind (Abbildung 1). Die beiden Bögen können in verschiedenen Winkeln zueinander eingestellt werden.

Zwei Hochgeschwindigkeits-Kameras (SpeedCam® Visario g2, Weinberger® GmbH) filmen die Bildern von den Schirmen der Bildverstärker ab. Die entstehenden digitalen Videosequenzen können in Abhängigkeit von Aufnahme Frequenz und Bildauflösung bis zu 16 Sekunden lang sein. Die maximale Frequenz beträgt 2000 Bilder pro Sekunde, die maximale Auflösung ist 1536 x 1024 Pixel (besser als HD-TV Qualität). Mit Hilfe eines Shutters kann Bewegungsartefakten bei sehr schnellen Bewegungen entgegengewirkt werden. Durch die Zoom-Möglichkeit von 16 Zoll (Vollbild) über

11 Zoll und 8 Zoll bis zu 6 Zoll können Strukturen bis zu 0,1 mm aufgelöst werden. Zwei zusätzliche Schwarz-Weiß-Realbild-Hochgeschwindigkeit-Kameras (SpeedCam® GmbH MiniVis, Weinberger®) können frei in der Szene positioniert werden, um einen Überblick zu geben oder ein Detail (z.B. das Aufpußen) zu überwachen. Sie haben eine hohe Lichtempfindlichkeit, eine Auflösung von 512 x 512 Pixeln und eine Aufnahme-frequenz von bis zu 2500 Bilder/sec.



Abb. 1: Hochgeschwindigkeits-Röntgenvideographieanlage (bipolarer Aufbau) in Kombination mit zwei zusätzlichen Hochgeschwindigkeit-Kameras für simultane Realaufnahmen.

Die Kameras sind synchronisiert und alle vier Videos können gleichzeitig live mit Hilfe der Software Visart® (Weinberger® GmbH) überwacht werden. **Durch die Nutzung eines Post- Triggers sind die gespeicherten Aufnahmen synchron.** Sie können dann mit Visart® weiter bearbeitet werden. **Auch eventuelle Kraftmesselemente im Versuchsaufbau und Elektromyographen können an den Trigger angeschlossen werden.** Auch Tonaufnahmen (Vogelgesang) und Herzdruckmessungen (am Schaf) wurden auf diese Weise bereits mit den Röntgenaufnahmen synchronisiert (Projekte siehe 2.2.4).

Um dieses System wie oben beschrieben zu optimieren, wurden zu Beginn des Vorhabens verschiedene Verbesserungen an der ursprünglichen Konfiguration vorgenommen. Die Frequenz der die Bildverstärker abfilmenden Kameras wurde von 1000 auf 2000 Bilder/sec erhöht. Der Trigger wurde installiert und die Ansteuerung der Kameras verbessert, um optimierte Synchronizität aller vier Kameras zu erreichen. Hinter der Strahlenquelle wurden Filter zur Verbesserung der Bildqualität eingefügt. Vor den Bildverstärker lässt sich nun ein Gitter einschieben, das als Referenz zur Korrektur

der noch minimal vorhandenen Verzerrungseffekte (Kissenverzerrung, S-Verzeichnung) dient. Die Software Visart® **wurde angepasst, so dass Ausrichtung und Zoomfaktor** der Kameras ferngesteuert werden können, die Sequenzen aller vier Kameras gleichzeitig gespeichert werden können (Zeitersparnis!) sowie mit unterschiedlichen Geschwindigkeiten abgespielt und je nach Nutzerwunsch benannt werden können. Außerdem können die Rohdaten nun auf dem Archivserver der Universität Jena gesichert werden.

Zur Durchführung von Tierexperimenten in der Röntgenvideographieanlage, vor allem im biplanaren Aufbau (siehe Abbildung 1) wurden verschiedenste Versuchsaufbauten entwickelt. Darunter befinden sich: ein Laufband, das innerhalb der Strahlengänge kein röntgendichtes Material enthält, ein motorgetriebenes Laufseil, Laufstrecken mit integrierten Kraftmessplatten sowie ein stufenlos neigbarer Aufbau (0° - 90°) mit Kraftmesselement (siehe Abbildungen 2 und 3), auf denen verschiedene Substrate (Laufstrecke, Laufstange) aufgebracht werden können.

Entwicklung eines Kraft- und Momentmesssystems

Hardware



Abb. 2: Kraftmessaufbau integriert in der biplanaren Röntgenanlage, bestehend aus Grundgestell, Baugruppe mit Kraftmessplatte, Einhausung, Messverstärker, A/D-Wandler.

Das im Projekt in intensiver Zusammenarbeit der Zoologen und der Biomechaniker entwickelte Messsystem zum Messen der Substrat-Reaktionskräfte hat folgende Eigenschaften und Parameter:

- Messung der Reaktionskräfte („Substrate reaction forces“, SRF) während des Kletterns kleiner Säugetiere mit einer Masse zwischen 100 g und 1000 g,
- Messung der SRF bis zu einem Wert von 20 N in jeder Raumrichtung (x-, y-, z-Achse),
- mechanische Integration in die biplanare Röntgenanlage,
- keine Beeinflussung der Röntgenaufnahme,
- Einstellbare Substratneigung zwischen 0° (horizontal) und $\pm 90^\circ$ (vertikal),
- Messfrequenz bis 2000 Hz und
- Synchronisierung der Messsignale mit den Röntgenaufnahmen ist möglich.

Die Komponenten des Aufbaus sind das Grundgestell mit der Möglichkeit zum Einstellen des Substratwinkels, die Baugruppe mit den Kraftmessplatten fürs Klettern und den Klettersubstraten, einer Einhausung für die Tiere, Messverstärker, eine A/D-Wandlereinheit und ein Messdaten-Aufzeichnungssystem.

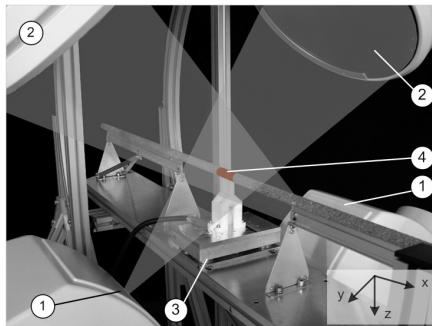


Abb. 3: Komplettsystem zur Kraft-Moment-Messung des Substratkontakts. Das System besteht aus der biplanaren Röntgenanlage mit Röntgenquellen (1) und Bildwandlersystemen (2), der/den Kraftmessplatte(n) (3) und dem „sensorisierten“ Substratabschnitt (4).

Während des Experiments klettert das Tier auf dem Substrat (siehe Element 4 in Abbildung 3). Das Substrat besteht aus drei Segmenten – zwei passive und ein sensorisiertes. Die Kraftmessplatten sind Produkte der Fa. Kistler®, welche in Verbindung mit dem zugehörigen Messverstärker (Typ 9865E) kraftproportionale Messsignale erzeugen. Die analogen Spannungswerte werden mit einer A/D-Wandlerkarte (Typ

USB-6229) der Fa. National Instruments NI® digital gewandelt, so dass diese mit der Software LabView® von NI® weiter verarbeitet werden können.

Niederfrequente Schwingungen des Aufbaus waren zu vermeiden. Aus diesem Grund kommen versteifte Substratlagerungen zum Einsatz, die durch Verstellmöglichkeiten die präzise Ausrichtung der einzelnen Substratabschnitte zueinander erlauben. Die Konstruktion wurde so ausgeführt, dass sie zukünftig auch hängend betrieben und für die Gewinnung von Daten bei Hangeltletterern verwendet werden kann. Zudem stehen verschiedene Substratdurchmesser und -oberflächen (siehe Tabelle 1) zur Verfügung, die einfach gewechselt werden können. Zur schnellen Entfernung von Verschmutzungen sind ebene Blechabdeckungen installiert worden.

Um die Leistungsfähigkeit des Messaufbaus zu prüfen, wurde ein Testalgorithmus für statische und dynamische Messungen erstellt. Die Prüfung erfolgt mittels eines kalibrierten Ein-Achs-Referenzsensors, der aus x-, y- und z-Richtung die Messzone des Aufbaus anfährt.

Tab. 1: Zur Verfügung stehende Substrataufbauten (d = Durchmesser [mm]; b = Breite [mm]).

arboreales Substrat	
Holz, korkbeschichtet	d = 16, niedrig
	d = 16
	d = 20
	d = 35
	d = 45
Holz	d = 10
	d = 20
	d = 30
terrestrisches Substrat	
Holz, korkbeschichtet	b = 200

Aufbau eines Kalibrierstandes für 6D-Kraft- und Momentmessung

Um eine Kalibrierung der Kraft- und Momentmesssysteme zu ermöglichen, wurde eine Kalibriervorrichtung entwickelt. Hiermit können die aufgebauten 6D-Kraft-Moment-Messsysteme in den jeweiligen Achsen kalibriert werden, sowie Messunsicherheiten und Linearität des Messsystems quantifiziert werden. Hierfür wurde der Aufbau so entwickelt, dass eine Einkopplung einer achsreinen Kraft oder eines achsreinen Momentes sowie von kombinierten Lasten möglich ist.

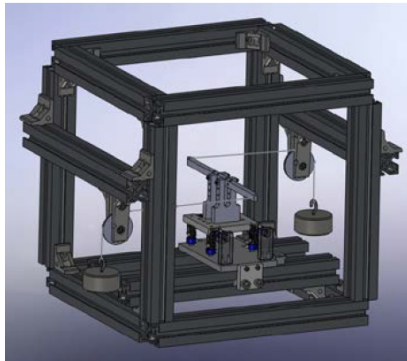


Abb. 4: Eigenaufbau eines Kalibrierstands für 6D-Kraft-Moment-Messsysteme. Hier ist die Einleitung eines Moments dargestellt.

Software zur Kraftmessung

- Der Funktionsumfang der selbst entwickelten Software beinhaltet
- automatische Steuerung des Experiments (Triggerung, Synchronisierung mit der Röntgenanlage und den Echtbild-Kameras)
- Datenerfassung und -verarbeitung
- Berechnung und Ausgabe der gemessenen Kräfte
- Speicherung der Daten

Erweiterung des Messsetups für Momentmessung

Die Messung stellt auch im internationalen Vergleich ein Novum dar, so dass weiterhin konzeptionelle und technologische Herausforderungen bestehen. Besondere Berücksichtigung musste die Anforderung finden, dass die Messung der Momente im Strahlengang der Röntgenanlage stattfinden soll. Einerseits darf die Röntgenstrahlung die Kraftmessung nicht stören, andererseits darf das Kraftmesssystem die Bild erfassung mittels Röntgenanlage nur minimal beeinflussen.

Unter Berücksichtigung der Messung in Verbindung mit der Röntgenanlage wurde für die Messung der Momente ein neues Verfahren entwickelt. Dieses kombiniert die Kraftmessung mittels Kraftsensoren mit der Messung des Hebelarmes mittels der 3D-Röntgenanlage unter Nutzung der Software „SimiMotion®“. Die theoretischen Grundlagen wurden ausgearbeitet.

Die Kraftmessung erfolgt wie bei standardisierten Kraftmessplatten. Für die Momentmessung wird eine Kraftdifferenzmessung mit der Messung eines Hebelarms durch die Röntgenkinematographie kombiniert. Durch die invers-dynamische Auswertung der Kraftdaten verbunden mit den Daten aus der Auswertung der Röntgenaufnahmen können die am CoP wirkenden Momente berechnet werden.

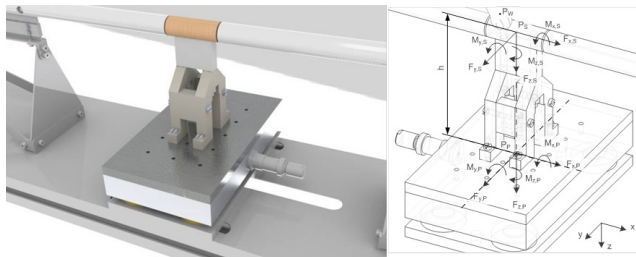


Abb. 5: Mechanischer Aufbau des Sensorsystems. Links: Integration in dem Kletteraufbau. Rechts: Grafische Darstellung der wirkenden Kräfte und Momente im System.

Messergebnisse der Momentmessung

Mit dem Aufbau lassen sich Momente messen. Das Ergebnis des Schlüsselexperiments ist in Abbildung 6 dargestellt. Der Verlauf der Kräfte entspricht den erwarteten. Der Verlauf der berechneten Momente ist plausibel. Weitere Experimente müssen folgen. Leider fehlen in der internationalen Literatur vergleichbare Werte.

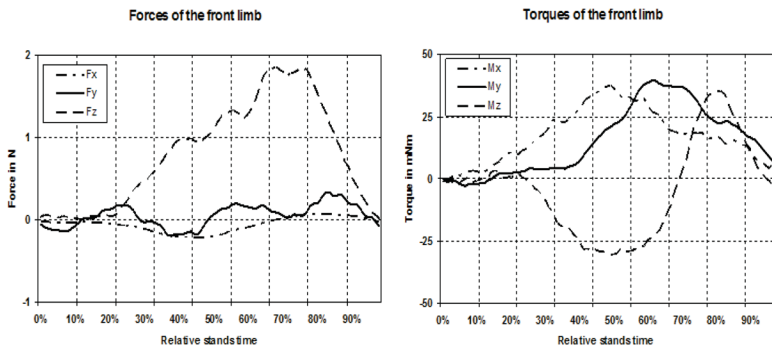


Abb. 6: Verlauf der Kräfte und Momente beim Klettern. Das zylindrische Substrat war waagrecht ausgerichtet.

Validierung der berechneten Momente

Zur Validierung dieser berechneten Momente wurde das vorhandene Messsetup um einen 3D-Kraft-Moment-Sensor erweitert. Dieser Sensor kann sowohl angreifende Kräfte als auch wirkende Momente in allen drei Raumachsen erfassen. Dazu wurden am Messsetup bauliche Anpassungen vorgenommen, um den Sensor so einbauen zu können, dass die Kräfte direkt am Sensormesspunkt eingekoppelt werden. Das Substrat der Laufstrecke (Holzstange) wurde so präpariert, dass auf der Ober- und Unterseite nur minimal visuelle und haptische Störungen die Aufmerksamkeit des Tieres beeinflussen können.

Die Hardware zum Betrieb des Sensors und zur Datenerfassung besteht aus einem Messverstärker, einer Verteilerbox, einer NI®-USB-DAQ Karte und einem PC mit der Software LabView®. Zusätzlich wurde ein Kabel für die Synchronisation mit anderen Geräten verwendet. Die Daten des Sensors werden über die Verteilerbox im

Messverstärker aufbereitet. An einer analogen Schnittstelle werden die der Kraft und Momente proportionalen Spannungswerte mit Hilfe der DAQ-Karte erfasst und in der Software LabView® verarbeitet und dargestellt.

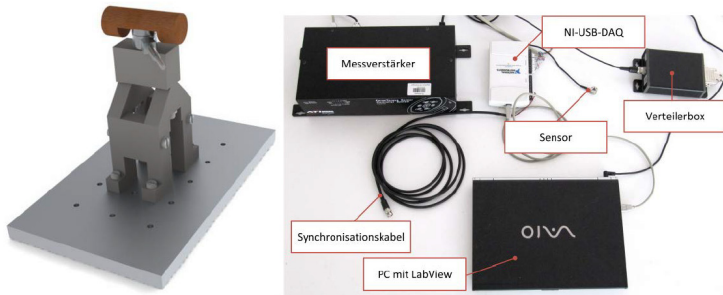


Abb. 7: Sensorsystem mit Kraft-/Moment-Sensor: Messkette.

Alternative Kraftmesszelle für kleine Kräfte und Momente

Der Aufbau mit den Kistler-Platten ist wegen seiner geringen Auflösung bei den Momenten für Messungen mit Vertebraten unter $m = 500 \text{ g}$ nur bedingt geeignet, da das Messsystem nahe der Auflösungsgrenze arbeitet. Deshalb wurde eine alternative Kraftmesszelle entwickelt. Die Konstruktion ist abgeschlossen.

Im Berichtsabschnitt wurde die Kalibrierung des aufgebauten Sensorsystems durchgeführt. Die Kalibrierkurven wurden aufgenommen. Die Messunsicherheit des Systems liegt unter 2 % und wurde als hinreichend für die Messungen bewertet. Das Übersprechen der Kanäle liegt unter 6 %.

Der Aufbau wurde bisher nur im Labor getestet, die Funktionsfähigkeit konnte nachgewiesen werden. Experimente zur Messung der Momente wurden aus Zeitgründen im Rahmen des Projektes InspiRat nicht mehr durchgeführt. Ein quantitativer Vergleich zum Setup mit den Kraftmessplatten ist in Arbeit.

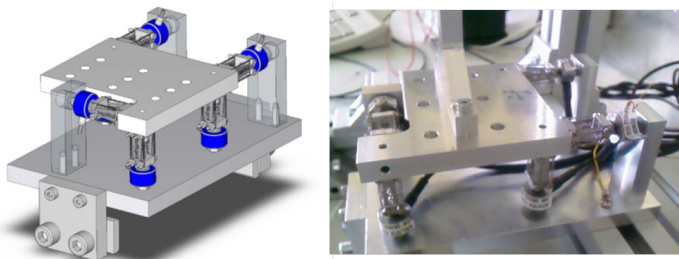


Abb. 8: Kraftmesszelle. Links: CAD-Modell. Rechts: Laboraufbau im Kalibrierstand.

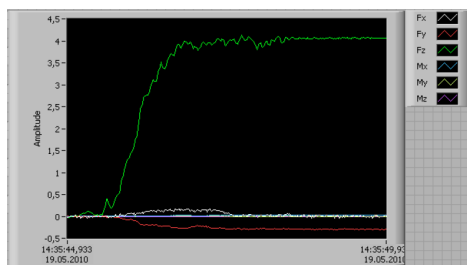


Abb. 9: Eigenes Messsystem zur Erfassung von Momenten und Kräften. Gemessene Kraft und Momentenverläufe dargestellt unter NI® LabView®.

2.1.2 Mechanismen zur Fortbewegung auf schmalen Substraten

Bei der terrestrisch-quadrupeden Lokomotion der Lepidosauria (Echsen) sind die Extremitäten vom Rumpf abgespreizt. Im Gegensatz dazu werden sie bei den Theria (Säugetiere) parasagittal zum Rumpf geführt. Die sich zu einem bestimmten Zeitpunkt in einem Schrittzyklus auf dem Substrat befindenden Füße bilden dabei die Unterstützungsfläche für den Körper. Bei der beschriebenen Fortbewegung ist diese mindestens so breit wie der Rumpf, sodass sich der Körperschwerpunkt meist über der Unterstützungsfläche befindet.

Bei der Lokomotion auf Substraten mit einem Durchmesser, der kleiner ist als der Durchmesser des Rumpfes des Tieres (arboreale Lokomotion), müssen die Füße dagegen enger unter den Körper gestellt werden. Dadurch wird die Unterstützungsfläche schmäler als der Rumpf und die Wahrscheinlichkeit, dass sich der Körperschwerpunkt

nicht über der Unterstützungsfläche befindet ist sehr hoch. Dadurch läuft das Tier Gefahr, zur Seite zu kippen und vom Substrat zu fallen (Abbildung 10 links).

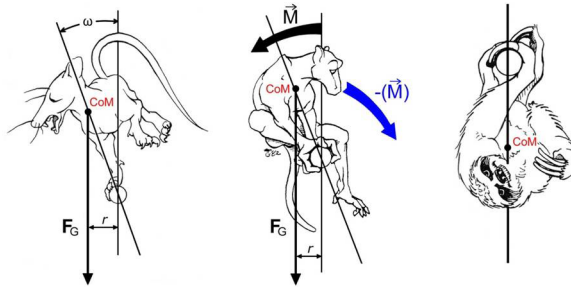


Abb. 10: Lokomotion auf arborealem Substrat. Links: Problematik der Fortbewegung auf schmalen Substraten. Mitte: Lösung mit Hilfe von Greifextremitäten. Rechts: Lösung durch Fortbewegung unter dem Substrat. CoM: Körperschwerpunkt (Center of Mass), FG: Gewichtskraft, M: Drehmoment, r: Abstand Substratmitte zu Wirkungsvektor von FG am CoM, ω : Winkelgeschwindigkeit.

Verändert nach CARTMILL M. (1985) Climbing, In: Functional vertebrate morphology (eds. Hildebrand M., Bramble D.M., Liem K.F. & Wake D. B.), pp. 73-88. The Belknap Press of Harvard University, Cambridge, MA

Je schmaler das Substrat wird, desto schwieriger wird es, den Körperschwerpunkt über der Unterstützungsfläche zu halten. Um dies zu erreichen, haben sich in verschiedenen Tiergruppen unterschiedliche Mechanismen zur sicheren Fortbewegung auf schmalen Substraten entwickelt. Diese wurden im Verlaufe des Vorhabens eingehend untersucht und sollen im Folgenden näher beschrieben werden.

Tabelle 2 gibt eine Übersicht über die untersuchten Tierarten und Aspekte sowie den Umfang der Studien.

Tab. 2: Überblick über die Studien des Versuchsvorhabens. Bei der Angabe der aufgenommenen Stemmphasen sind jeweils alle Tiere, alle Versuchssituationen sowie Vorder- und Hinterextremität zusammengefasst. Die Auswertung einer einzigen Stemmphase erfordert das Markieren von durchschnittlich ca. 250 Punkten (abhängig von Aufnahme Frequenz und Fortbewegungsgeschwindigkeit).

Art	Untersuchter Aspekt	Umfang
<i>Chamaeleo calyptrotus</i>	Neigungslaufen/Klettern -60°, -30°, 0°, +30°, +60°	Tiere: 3 Männchen Aufnahmetage: 39 Aufgenommene Stemmphasen: 762
<i>Rattus norvegicus</i>	Neigungslaufen/Klettern -60°, -45°, -30°, 0°, +30°, +45°, +60° terrestrisches Substrat vs. arbo- reales Substrat (Durchmesser: 20 mm und 40 mm)	Tiere: 6 Weibchen Aufnahmetage: 40 Aufgenommene Stemmphasen: 534
<i>Sciurus vulgaris</i>	Neigungslaufen/Klettern -60°, -30°, 0°, +30°, +60°	Tiere: 1 Männchen, 1 Weibchen Aufnahmetage: 19 Aufgenommene Stemmphasen: 411
<i>Choloepus didactylus</i>	Fortbewegung unter horizontalem Substrat	Tiere: 1 Männchen, 1 Weibchen Aufnahmetage: 34 Aufgenommene Stemmphasen: 187
<i>Saguinus oedipus</i>	Neigungslaufen/Klettern -60°, -45°, -30°, 0°, +30°, +45°, +60°	Tiere: 1 Männchen, 2 Weibchen Aufnahmetage: 30 Aufgenommene Stemmphasen: 486
<i>Loris tardigradus</i>	Neigungslaufen/Klettern -60°, -30°, 0°, +30°, +60°	Tiere: 1 Männchen, 1 Weibchen Aufnahmetage: 10 Aufgenommene Stemmphasen: 63

Stabilisierung mit Hilfe von Greifextremitäten

Lepidosauria: Beispiel Chamäleons

Die meisten Lepidosauria bewegen sich im Spreizgang fort. Das heißt, dass sie Ihre Füße weit außerhalb des Rumpfes aufsetzen. Zum Vortrieb dienen vor allem undulatorische Bewegungen des Rumpfes. Die Extremitäten werden zur Kraftübertragung

auf das Substrat eingesetzt. Im Gegensatz dazu bewegen sich Chamäleons auf schmalen Substraten fort, wobei sie ihre Füße eng unter den Rumpf setzen müssen. Dabei würden extreme Undulationen dazu führen, dass der Körperschwerpunkt oft weit außerhalb des Substrates und der Unterstützungsfläche liegen würde und das Tier Gefahr liefe abzustürzen.

Es ist bekannt, dass die undulatorischen Rumpfbewegungen bei Chamäleons im Gegensatz zu anderen Echsen stark eingeschränkt sind. Außerdem besitzen die Tiere Greifextremitäten: die Vorderextremität umfasst das Substrat zwischen der dritten und vierten Zehe, die Hinterextremität zwischen der zweiten und dritten Zehe (Abbildung 11 Mitte, unten). Mit Hilfe dieser Greifextremitäten können Momente erzeugt werden, die denen entgegenwirken, die das Tier vom Substrat stürzen lassen würden (Abbildung 11 Mitte).

Aus diesen Besonderheiten ergeben sich verschiedene Probleme. Im Vorhaben wurde nach der Lösung für zwei besonders bedeutende gesucht. 1) Um die für Lepidosauria ungewöhnliche Stellung der Extremitäten zu erreichen, ist eine besondere Beweglichkeit bei Chamäleons erforderlich. 2) Die Verminderung des Vortriebs, die mit im Vergleich zu Säugetieren geringeren Rumpfbewegungen einhergeht, muss an anderer Stelle ausgeglichen werden.

In den während des Vorhabens durchgeführten Studien hat sich gezeigt, dass beim Chamäleon im Gegensatz zu anderen Lepidosauria eine hohe Beweglichkeit im Schultergürtel besteht. Diese beruht auf einer Rinne im Sternum, in der das Scapula-coracoid gleiten kann. Außerdem zeigt das Chamäleon im Schrittzklus einen Übergang von gespreizter zu nahezu parasagittaler Extremitätenführung (Abbildung 11 oben). Dadurch sind die Gelenke sowie die einzelnen Segmente der Extremitäten annähernd in Bewegungsrichtung ausgerichtet. Somit wird die Schrittlänge vergrößert und die Beine tragen zum Vortrieb bei. Durch diese funktionelle Parasagittalisierung ähnelt die Lokomotion der Chamäleons z.T. eher der der Theria als der anderer Lepidosauria. Eine weitere Besonderheit des Chamäleons, die an Säugetiere erinnert, ist die funktionelle Unterteilung des Rumpfes. Im caudalen Teil sind die Rippen stark reduziert (Abbildung 11 Mitte), so dass dieser Teil Ähnlichkeit mit einer Lumbalwirbelsäule hat.

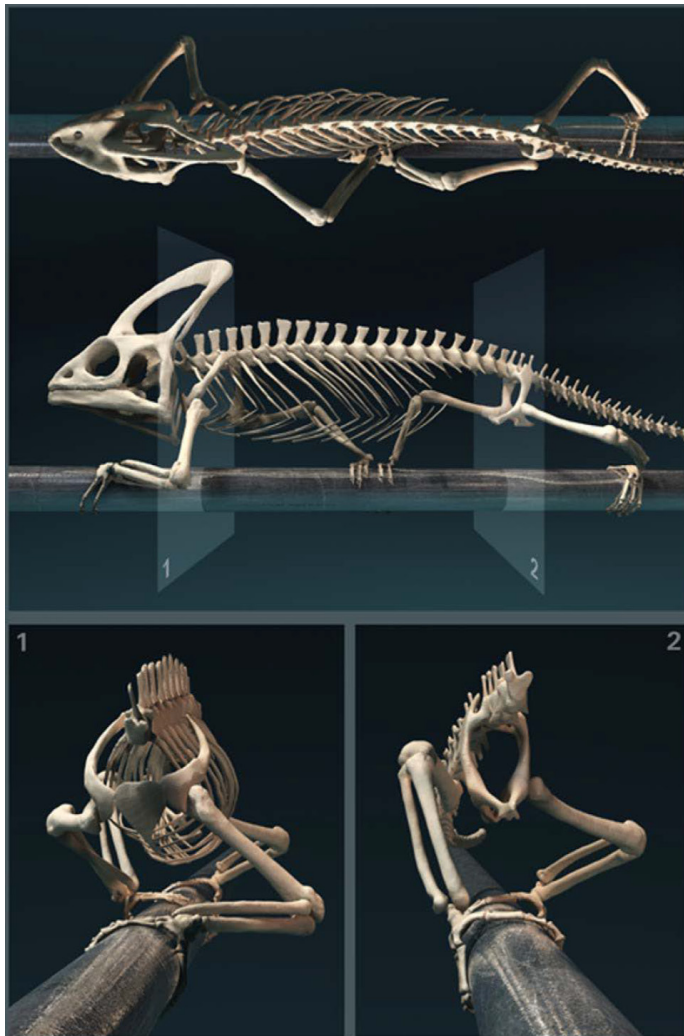


Abb. 11: Skelett eines sich arboreal fortbewegenden Chamäleons (Schnittebenen: unten 1 und 2 (s. Mitte)). Nach FISCHER et al. (2009).

Theria: Beispiel Loris und Lisztaffen

Primaten als Vertreter der Theria haben bereits eine parasagittale Extremitätenführung. Wie Chamäleons besitzen sie Greifextremitäten, bei denen aber der Pollex bzw. Hallux den anderen Fingern bzw. Zehen gegenübergestellt wird. Lisztaffen haben außerdem Krallen zur Verankerung am Substrat und möglicherweise eine eingeschränkte Greiffähigkeit (vgl. Abb. 12). Zur arborealen Fortbewegung von Primaten gibt es bereits zahlreiche Untersuchungen, sodass während des Vorhabens vor allem Neigungslaufen und Klettern eingehender betrachtet wurden.

Wie beim Laufen auf schmalen Substraten profitieren Primaten auch beim Klettern von ihrer Fähigkeit Gewicht aktiv zwischen Vorder- und Hinterbeinen zu verschieben und dadurch die auf den Rumpf wirkenden Drehmomente zu kontrollieren. Dieser Effekt ist beim Zwerglori besonders deutlich, der mit seinen kräftigen Autopodien (Greifzangen, ähnlich dem Chamäleon) und einer vergleichsweise hohen Beinsteifigkeit auch bei einem Neigungswinkel von 60° noch große Kräfte senkrecht zum Substrat aufbringt, was dem Lisztaffen wie auch den Ratten aufgrund ihrer schwächer ausgeprägten Greiffähigkeiten nicht mehr gelingt.

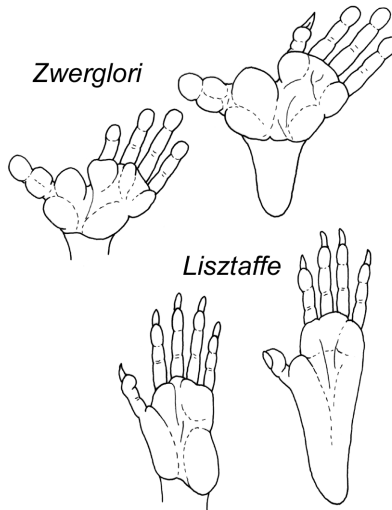


Abb. 12: Greiffüße des Zwergloris und des Lisztaffen. Nach BIEGERT 1961

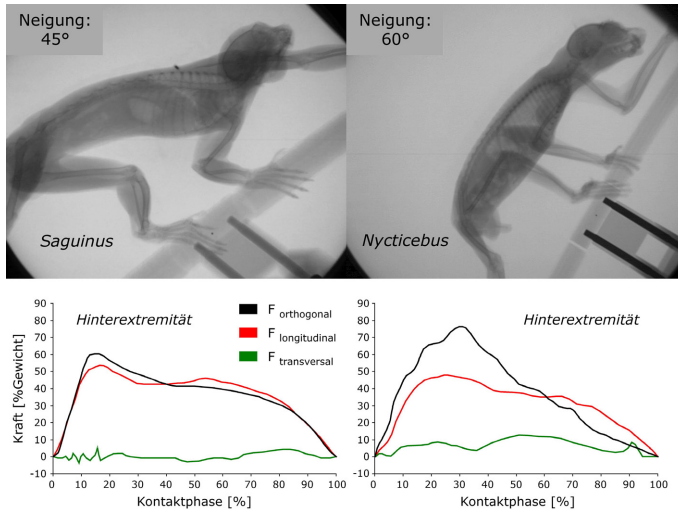


Abb. 13: Kinematik und Dynamik des Kletterns bei Primaten, links: Lisztaffe und rechts: Zwerglori; oben: Röntgenbilder, unten: zugehörige Substrat-Reaktionskräfte.

Stabilisierung ohne Greifextremitäten

Theria: Beispiel Ratten

Im Gegensatz zu Chamäleons und Primaten haben Ratten keine Greifextremitäten, können sich aber trotzdem auf Substraten fortbewegen, deren Durchmesser kleiner als ihr Rumpfdurchmesser ist. Die Krallen der Tiere dienen zwar zur Verankerung im Substrat, sie können aber nicht verhindern, dass die Ratten seitwärts kippenden Momenten ausgesetzt sind.

Im Vergleich der Lokomotion auf unterschiedlich breiten Substraten stellte sich heraus, dass Ratten im Gegensatz zu Primaten laterale Fußfallsequenzen bevorzugen. Dabei wird nach dem Aufsetzen einer Hinterextremität zunächst die ipsilaterale (gleichseitige) Vorderextremität aufgesetzt. Auf schmalen Substraten würde der Körperschwerpunkt dabei die Unterstützungsfläche zu einer Seite verlassen. Um dem entgegenzuwirken, flektieren (beugen) die Tiere ihre Wirbelsäule so, dass der

Körperschwerpunkt über der Unterstützungsfläche bleibt (Abbildung 14). Diese stärkere Lateralflexion wurde außer bei Ratten auch bei Primaten beobachtet, ebenso eine Verminderung von vertikalen und lateralen Auslenkungen des Körperschwerpunktes und eine „geducktere“ Körperhaltung. Deshalb ist anzunehmen, dass diese Eigenschaften durch biomechanische Bedingungen der Fortbewegung auf schmalen Substraten bestimmt werden, die unabhängig davon sind, ob das Tier Greifextremitäten oder Krallen hat.

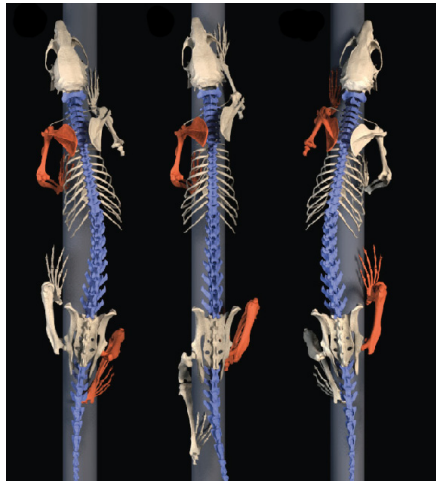


Abb. 14: Lateralebewegung der Wirbelsäule bei einer sich auf schmalen Substrat fortbewegenden Ratte. Nach SCHMIDT & FISCHER (2010).

Theria: Beispiel Eichhörnchen

Eichhörnchen haben wie Ratten Krallen und keine Greifextremitäten. Sie bewegen sich im Gegensatz zu diesen aber eher in synchronen Gangarten fort, bei denen die Extremitäten eines Gürtels kurz hintereinander bis gleichzeitig auf Fuß. Dabei trägt auch der Rumpf durch relativ starke Flexion und darauf folgende Extension in der Sagittalebene des Körpers zum Vortrieb bei. Bei der Fortbewegung auf schmalen Substraten wirken diese starken Bewegungen und die dabei entstehenden hohen Kräfte der Stabilität des Tieres entgegen.

In der hier durchgeführten Untersuchung hat sich gezeigt, dass Eichhörnchen auf schmalen Substraten ihre Geschwindigkeit vermindern und vertikale Auslenkungen des Körperschwerpunktes verringern. Außerdem findet sich eine Funktionsteilung zwischen den beiden Vorderextremitäten. Die Ergebnisse weisen darauf hin, dass die erstaufliegende Vorderextremität schockabsorbierend wirkt und die Konsistenz des Substrates testet und die zweitaufliegende dann an die Situation angepasst sicher aufsetzt.

Fortbewegung unter dem Substrat

Theria: Beispiel Faultier

Ein ganz anderer Mechanismus zur sicheren Fortbewegung entlang schmaler Substrate ist die Lokomotion unterhalb des Substrats. Dadurch muss der Körperschwerpunkt nicht über der schmalen Unterstützungsfläche balanciert werden, sondern er wird unter dem Substrat aufgehängt. Dieser Mechanismus wurde beim Faultier näher untersucht. Dabei stellte sich die Frage, welche kinematischen Parameter sich für eine hängend-quadrupede Fortbewegung ändern müssen. Außerdem kann bei dieser Körperhaltung der Thorax nicht mehr wie bei anderen Theria zwischen den Vorderextremitäten aufgehängt werden (siehe Abbildung 15), **sondern es waren Veränderungen in der Muskulatur zu erwarten.**

Die Untersuchungen im Verlaufe des Vorhabens haben gezeigt, dass die Kinematik der Extremitäten beim Faultier sich von der anderer Säugetiere nicht unterscheidet. Eine Besonderheit sind die Füße, die zur Aufhängung am Substrat dienen (siehe Abbildung 14), aber nicht zum Vortrieb beitragen. Für die Hinterextremität stellt das einen Gegensatz zu anderen Säugern dar, bei denen der *Tarsometatarsus* ein propulsives Element ist.

Die *Scapula* zeigt eine Lagebeziehung zum *Thorax* wie sie auch bei anderen Säugetieren zu finden ist, die eine *Clavicula* besitzen. Sie ist allerdings beim Faultier, relativ zur Körpergröße betrachtet, kürzer als bei anderen Säugern. Zwischen *Clavicula* und *Sternum* ist ein Ligament ausgebildet, das eine erhöhte Mobilität erlaubt und auf das Wirken von Zugkräften an dieser Stelle hinweist. Auch in der Schultermuskulatur konnten einige Veränderungen beobachtet werden (Verlagerung von Ansätzen, Verschmelzungen), die sich auf die umgekehrte Körperhaltung zurückführen lassen. Einige davon sind bei beiden rezenten Faultierarten zu finden, andere unterscheiden

sich zwischen ihnen und stellen somit unterschiedliche Lösungen für dasselbe Problem dar.

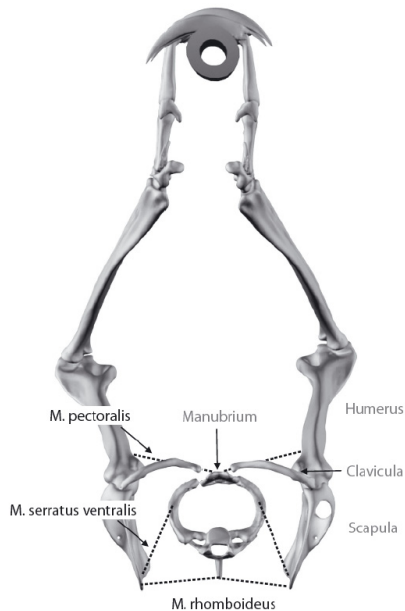


Abb. 15: Frontalansicht der Vorderextremitäten des Faultiers in ihrer Lagebeziehung zum Thorax. Die gepunkteten Linien stellen die Muskeln dar, die den Rumpf bei anderen Theria zwischen den Vorderextremitäten aufhängen. Nach NYAKATURA & FISCHER (2011).

Die Rumpfwirbelsäule begrenzt schon rein anatomisch stärkere Streckungen. Also sind beim Faultier wie bei Ratte und Eichhörnchen vertikale Bewegungen des Körperschwerpunktes vermindert, was die Übertragung von Kräften auf das Substrat verringert. Das konnte auch mit Hilfe eines invers dynamischen Modells gezeigt werden. Dieses Modell identifiziert außerdem einige Eigenschaften der Faultierlokomotion als biomechanische Notwendigkeiten. Alles in allem sind die Wirbelsäulenbewegungen des Faultiers vergleichbar mit denen anderer arborealer Säugetiere und spiegeln somit, wie die Kinematik der Extremitäten, ein generelles Muster wider.

Bei den Untersuchungen am Faultier wurde erstmals die von der Arbeitsgruppe um E. Brainerd und S. Gates entwickelte Methodik des Scientific Rotoscoping (markerlose

Form des XROMM: x-ray reconstruction of moving morphology) angewendet (siehe 2.3.3). Dabei wird aus einem CT-Scan das Skelett des Tieres dreidimensional rekonstruiert und an die biplanaren Röntgensequenzen angepasst. Es entsteht eine Animation des sich fortbewegenden Tieres, die so präzise ist, dass sich daraus detaillierte Daten der Translationen und Rotationen aller Knochen gewinnen lassen. Diese Methodik wurde im Rahmen des Vorhabens an die Gegebenheiten der mit der unter 2.1.1 beschriebenen Röntgenvideographieanlage aufgenommenen Röntgensequenzen angepasst. Sie kam außerdem bei der Untersuchung der Ratten und Lisztaffen sowie in den Folgeprojekten mit Vögeln und Echsen (siehe 2.2.4) zum Einsatz.

2.1.3 Mechanismen zur Fortbewegung auf geneigten Substraten

Ähnliche Mechanismen bei allen untersuchten Arten

Der Fortbewegung auf geneigtem Substrat begegnen die während des Vorhabens untersuchten Arten (unter Ausklammerung des Faultiers) mit sehr ähnlichen Mechanismen. Nur im Detail finden sich einige Unterschiede.

Die Tiere zeigen eine zunehmend geduckte Körperhaltung beim Auf- sowie beim Abstieg. Außerdem setzen sie die Extremitäten weiter zum unteren Ende des Substrats, sodass sie annähernd in Richtung des Schwerkraftvektors zeigen. Dadurch bleibt die Unterstützungsfläche nicht relativ zum Substrat, sondern relativ zum Erdmittelpunkt unter dem Körper des Tieres. Das führt zu einer erhöhten Stabilität, verschafft dem Tier aber auch mehr Vortrieb entgegen der Schwerkraft. Diese Veränderungen der Körper- und Extremitätenhaltung wurden von anderen Arbeitsgruppen auch bei Beuteltieren beobachtet. Sie sind unabhängig von Geschwindigkeit und Körperproportionen und stellen daher wahrscheinlich Grundprinzipien für das Neigungslaufen dar. Bei Chamäleons und Loris sind sie weniger stark ausgeprägt, da diese Tiere mit Hilfe ihrer effektiven Drehmomente erzeugen, die zu Stabilität und Vortrieb beitragen.

Beim Aufwärtslaufen setzen Ratte, Eichhörnchen und Lisztaffe ihre Vorderextremitäten immer weiter seitlich am Substrat auf, das Chamäleon auch die Hinterextremitäten. Der Loris setzt bei allen Neigungen beide Extremitäten etwas lateraler (Abbildung 16). Das heißt, er umgreift das Substrat auch, wenn es nicht geneigt ist, während die anderen untersuchten Arten eher auf dem Substrat laufen. Für Ratten und Lisztaffen

hat sich gezeigt, dass sie beim Abwärtslaufen die Vorderextremitäten auf dem Substrat lassen und die Hinterextremitäten lateraler setzen. In diesem Fall entspricht also die Funktionsweise der Vorderextremitäten beim Anstieg der der Hinterextremitäten beim Abstieg und umgekehrt. Das spiegelt sich auch in den übertragenen Kräften (Abbildung 16) wider.

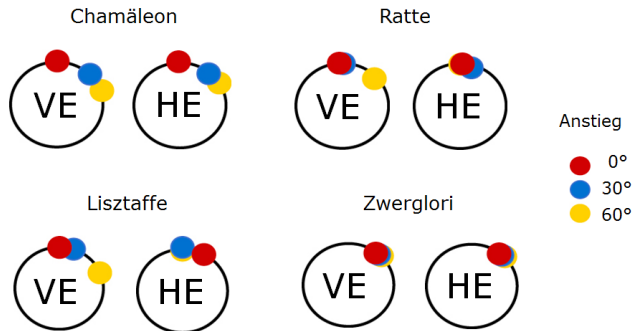


Abb. 16: Auf Fußpunkte im Verhältnis zum Stangenquerschnitt bei verschieden ansteigendem Substrat. VE: Vorderextremität, HE: Hinterextremität Wechsel zwischen Neigungslaufen und Klettern

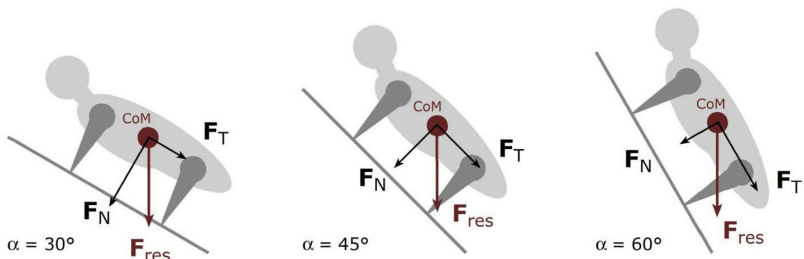


Abb. 17: Verhältnis der Komponenten der Gewichtskraft bei verschieden geneigtem Substrat. Es ist zu beachten, dass bei größeren Winkeln der Körperschwerpunkt hinter der Unterstützungsfläche liegt. CoM, Center of mass (Körperschwerpunkt), F_N , Normalkraft (vertikal zum Substrat), F_T , Tangentialkraft (parallel zum Substrat), F_{res} , resultierende Kraft (Gewichtskraft).

Es hat sich als schwierig erwiesen, eine einheitliche Definition für „Klettern“ zu finden. Ein relativ praktikabler Ansatz versucht, die Substratreaktionskräfte dafür zu nutzen.

Bei den während des Vorhabens untersuchten Arten haben sich folgende Besonderheiten während des Neigungslaufens gezeigt, die zur Definition von Klettern dienen könnten:

1. Die Kraftkomponente vertikal zum Substrat nimmt beim Aufwärtslaufen in der Hinterextremität zu, beim Abwärtslaufen in der Vorderextremität, da das Gewicht immer mehr auf die sich jeweils am unteren Substratende befindliche Extremität verlagert wird. Ab einem bestimmten Winkel nimmt diese Kraftkomponente aber wieder ab, weil ein großer Teil der Gewichtskraft in die Kraftkomponente parallel zum Substrat eingeht (Abbildung 16). Dieser Punkt liegt bei allen untersuchten Tieren zwischen 30° und 60° Neigung, mit Ausnahme des Zwerglori. Bei den Ratten und Lisstaffen, bei denen auch 45° untersucht wurden liegt er zwischen 45° und 60° bzw. zwischen 30° und 45° (Abbildung 17).

2. Solange die Tiere über das Substrat laufen bringen sie vertikal Druck auf das Kraftmess-element auf. Ab einer bestimmten Neigung liegt der Körperschwerpunkt aber nicht mehr über sondern hinter der Unterstützungsfläche (Abbildung 17). Das Tier muss mit der Extremität am oberen Ende des Substrats Zug ausüben, um sich am Substrat zu halten. Das war bei allen untersuchten Arten bei (ab) 60° Neigung der Fall (vgl. Abbildung 18).

3. Bei der Lokomotion auf flachem Substrat enthält die Kraft parallel zum Substrat in der Vorder- sowie in der Hinterextremität eine bremsende und eine propulsive Komponente. Meist bremsst die Vorderextremität stärker und die Hinterextremität erzeugt vor allem Vortrieb. Beim Aufwärtslaufen bremsst bereits die Schwerkraft das Tier und ab einer gewissen Neigung müssen beide Extremitäten Vortrieb leisten. Umgekehrt müssen beim Abwärtslaufen beide Extremitäten ab einem bestimmten Punkt das Tier gegen die Schwerkraft bremsen. Bei allen während des Vorhabens untersuchten Arten war das bereits bei 30° der Fall (vgl. Abbildung 18) und ist wahrscheinlich ein allgemeines Charakteristikum des Neigungslaufens.

Die Substratneigung, bei der ein Tier klettert, ist abhängig von der Lage des Körperschwerpunkts, den Proportionen des Tieres, und ob es z.B. mit Krallen oder Greifextremitäten klettert. Sie ist demnach von Art zu Art unterschiedlich. Wenn man nach den Kriterien 1. und 2. urteilt, scheint bei den hier untersuchten Arten Klettern zwischen 45° und 60° zu beginnen. Nur die Zwergloris verhalten sich anders. Als hochgradig angepasste Spezialisten können sie jedwede Neigung mit der gleichen mechanischen Strategie meistern.

2.1.4 Energiebetrachtung und invers-dynamische Analyse

Modell für die invers-dynamische Analyse (IDA): Ausgangskonfiguration

Die invers-dynamische Analyse ist ein wichtiges Werkzeug für das Verständnis:

- Zusammenarbeit zwischen Rumpf und Extremitäten und deren Beiträgen zum Klettern und
- Muskelaktivierung, um den Leistungsbedarf und damit den „Energie-Verbrauch“ abzuschätzen.

Das im Projekt entwickelte mathematische Modell erlaubt es, aus den Messdaten der Kraftmessung (den Substratreaktionskräften) und den Gelenkkordinaten Nettogelenkräfte und -momente zu berechnen.

Präzisierung des Modells

- 1) Vertikales Klettern kommt prinzipiell in den sagittalen Ebenen vor. Daher wurde die Bewegung zwei-dimensional betrachtet.
- 2) Die hinteren und vorderen Extremitäten wurden jeweils als zwei Segmente modelliert.
- 3) Der Rumpf wurde in drei Segmente geteilt, welche *Pelvis*, *Abdomen* und *Thorax* plus Kopf repräsentieren. Der so definierte Modell-„Thorax“ repräsentiert die gesamte Masse und die Massenträgheitsmomente von Thorax, Hals und Kopf.
- 4) Gelenke wurden als ideale Gelenke vereinfacht.

Wichtigstes Ziel der Modellentwicklung war es, die Netto-Momente in den Gelenken zu berechnen. Im Fall von einzelnen Kontakten (serielle Anordnung) hat das Modell den Freiheitsgrad 7 (DoF 7) und sieben unbekannte Netto-Momente. Bei doppeltem Kontakt (geschlossene kinematische Kette) hat das Modell DoF 5, aber acht unbekannte Netto-Momente (in: Sprunggelenk, Kniegelenk, Hüfte, Gelenk Pelvis-Abdomen, Gelenk Thorax-Abdomen, Schultergelenk, Ellbogengelenk und Handgelenk).

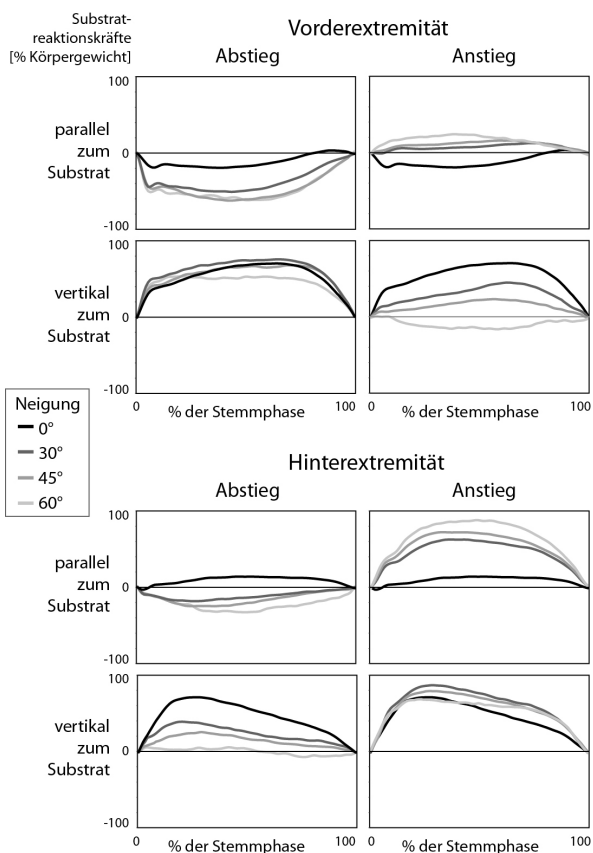


Abb. 18: Substratreaktionskräfte am Beispiel eines Lisztaffen. Bei der Kraft parallel zum Substrat bedeuten positive Werte Vortrieb und negative Werte Bremsen. Für die Kraft vertikal zum Substrat bedeuten positive Werte, dass das Tier mit seinem Gewicht auf das Kraftmesselement drückt. Bei negativen Werten zieht es dieses zu sich.

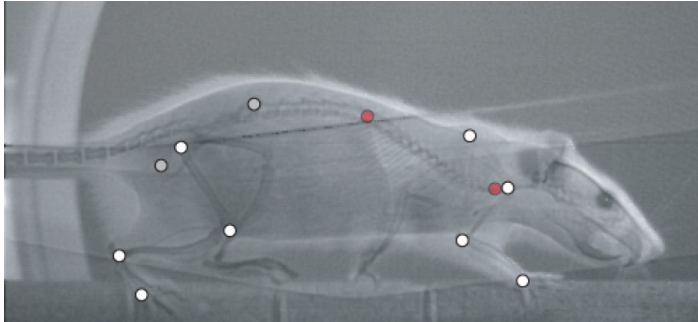


Abb. 19: Röntgenbild: Markierungen für das Modell der invers-dynamischen Analyse. Gelenkpunkte und Becken (weiß), Punkt auf der Halswirbelsäule und dem letzten Brustwirbel (grau). [Röntgenbild: A. SCHMIDT]

Berechnung der Momente mit der NEWTON-EULER-Methode

Die „NEWTON-EULER Methode“ wird in der Praxis als Standard-Ansatz für die Berechnung der inversen Dynamik genutzt. Hierbei werden die Segmente individuell betrachtet. Eingangsparameter sind:

- aus der Morphometrie: Massen und Trägheitseigenschaften
- aus der Bewegungsanalyse (Kinematik): Linear- und Winkel-Verschiebungen, deren Geschwindigkeiten und Beschleunigungen
- vom dynamischen Messtand (Kinetik): Substratreaktionskräfte und -momente

Netto-Kräfte und -Momente in den Gelenken wurden basierend auf den kinematischen und kinetischen Eingangsparametern unter Nutzung der Newton-Euler-Gleichungen errechnet. Diese Berechnungsweise wurde in einer Matlab®-Routine implementiert.

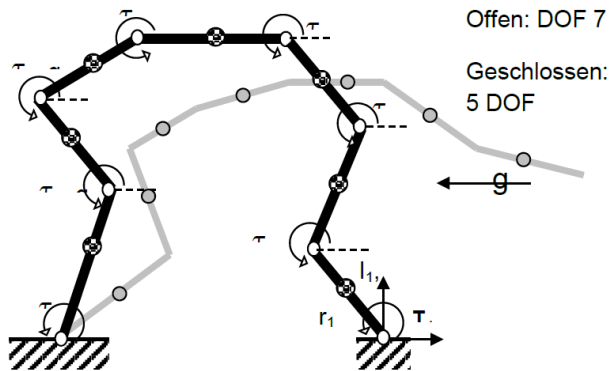


Abb. 20: Strukturdiagramm des Modells zur Berechnung der inversen Dynamik. Schwarz: geschlossene kinematische Kette (DoF 8), grau (offene kinematische Kette (DoF 7). Offene Kreise: Gelenke (incl. Bodenkontaktpunkte), gefüllte Kreise: Schwerpunkte der Segmente, τ_i : Nettogelenkmomente

Berechnung der Momente mit dem LAGRANGE-Ansatz

Bei der Nutzung des LAGRANGE-Formalismus für n generalisierte Koordinaten und m „Constraint- Gleichungen“ (Zwangsbedingungen) kann man die Momente in den Gelenken ausrechnen, ohne die Zwangkräfte und -momente zwischen Tier und Substrat zu messen.

Eingangsparameter sind:

- aus der Morphometrie: Massen und Trägheitseigenschaften.
- aus der Bewegungsanalyse (Kinematik): Winkel-Verschiebungen, deren Geschwindigkeiten und Beschleunigungen.

11-segmentiges Modell für die invers-dynamische Analyse

Im 7-segmentigen Modell wurden Thorax und Kopf als ein Segment repräsentiert. Dieses Modell bildete nicht ab, dass zwischen Vorderextremitäten und Rumpf keine Starrkopplung oder Festkörper-Gelenke (wie man es aus der Technik kennt) existieren.

Diese Verbindung zwischen Brustkorb und Vorderextremitäten wird im Organismus nur durch Muskeln stabilisiert. Außerdem zeigen die röntgenkinematographischen Analysen, dass nicht im Schultergelenk der wichtigste Antrieb der Vorderextremitäten während der Stemmphase liegt, sondern möglicherweise um einem hochgelegenen scapulären Drehpunkt. Denn in kleinen Quadrupeden wie Ratten scheint die *Scapula* eine wichtige Rolle für die Lokomotion zu spielen. Hier ist die Frage: Braucht man eine Modellabbildung der *Scapula*, um Momente im Rumpf richtig zu bestimmen? Darüber hinaus erwies es sich als sinnvoll, die Verbindung *Scapula-Thorax* in verschiedenen Varianten zu modellieren. Das Modell wurde deswegen von 7 auf 11 Segmente erweitert (siehe Abbildung 21).

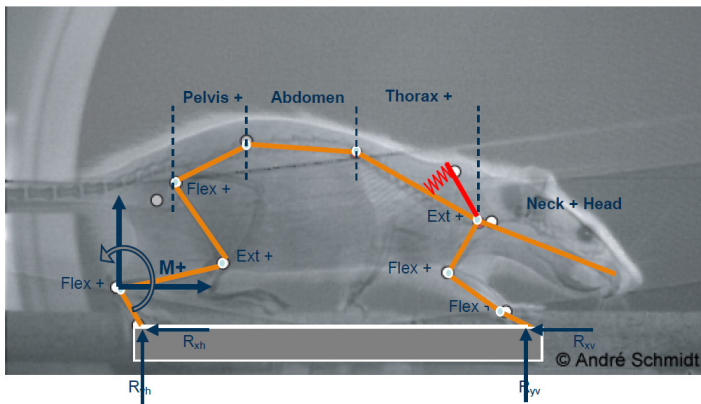


Abb. 21: 11-segmentiges Modell für die IDA. Hier wird die Vorderextremität 4-segmentig repräsentiert (Hand, Unterarm, Oberarm und Schulterblatt) und Hals und Kopf werden als getrennte Segmente modelliert.

Das 11-segmentige Modell wurde wie folgt aufgebaut:

- Vorderextremität (4 Segmente): Hand, Unterarm, Oberarm und *Scapula*
- Hinterextremität (3 Segmente): Fuß, Unterschenkel, Oberschenkel.
- Körperstamm (4 Segmente): Pelvis, Abdomen, Thorax, Hals + Kopf.

Für die Verbindung zwischen *Scapula* und *Thorax* wurden drei Modelle vorgeschlagen (Abbildung 22):

In den Varianten A und B wurde die *Scapula* (rot) mittels eines elastischen Elements

(Feder) und einer Kraft mit dem *Thorax* (schwarz) verkoppelt. In Variante C wird die Verkopplung ausschließlich durch eine Kraft realisiert. Die Idee dabei ist, dass die berechneten Kräfte und Momente in den Gelenken T13 (zwischen *Abdomen* und *Thorax*) von hinten und von vorn zwar den gleichen Betrag haben müssen, aber entgegengesetzte Richtungen. Mit diesen Daten wurden die Werte von Federsteifigkeiten und Kräften durch Optimierung identifiziert.

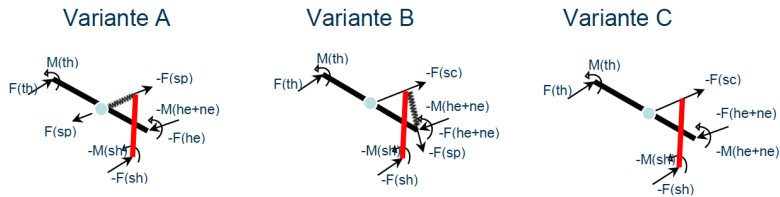


Abb. 22: Modell für die IDA - Mögliche Verbindungen zwischen Scapula (rot) und Thorax (schwarz).

Datenhandling

Das Modell wurde in einer automatisierten Matlab® Routine-Software implementiert. Eingangsparameter sind die Substratreaktionskräfte (SRF) und die Koordinaten der Gelenke.

Die Routine importiert „Rohdaten“. Diese werden falls notwendig zuerst interpoliert und gefiltert. Aus den gefilterten Koordinaten der Gelenke werden sowohl die lineare Translation, Geschwindigkeit und Beschleunigung des Segmentsschwerpunktes berechnet, als auch die rotatorischen Bewegungen des Segments, die Winkelgeschwindigkeit und -beschleunigung. Masse und Trägheitseigenschaften wurden aus Kadavermessungen gewonnen.

Ergebnisse der Routine sind:

- Zwangskräfte,
- das Netto-Moment,
- Leistung und Energietransfer in jedem Gelenk.

Außerdem werden die Lage, Geschwindigkeit und Beschleunigung des Gesamt-Körperschwerpunktes wie auch die totale Energie (kinetische + potentielle) errechnet. Der zeitliche Verlauf von potentieller und kinetischer Energie ist wichtig, um eine mögliche Energiespeicherung im Rumpf zu identifizieren.

Basierend auf den berechneten Daten liefern die „Variante A“ oder „Varianten A + B“ die plausibelsten Übertragungsfunktionen. Weitere Berechnungen von Messdatensätzen werden zeigen, ob die *Scapula* modelliert werden muss, um Nettomomente im Rumpf richtig zu bestimmen.

In einem weiteren Schritt wurde das Modell auf 18 Segmente erweitert. Dieses Modell berücksichtigt auch die schwingenden Extremitäten (siehe Abbildung 23). Das 18-segmentige Modell wurde bereits in die Berechnungsroutine implementiert. Weitere Plausibilitätstests dieses Modells müssen folgen.

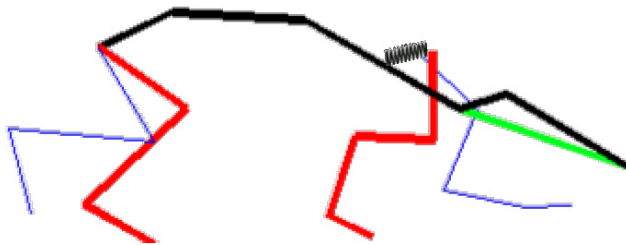


Abb. 23: 18-Segmentiges Modell für die IDA. Stick-figure-Darstellung. Die nicht fußenden Extremitäten sind in geringerer Linienstärke dargestellt.

Animation:

Die neue Routine bietet eine synchrone graphische Überlagerung der Kinematik der Segmente mit den Kontaktkräften bei der Bewegung des Tieres an (bisher realisiert für die Ratte).

„Plug & Play“ Funktionalität:

Um die Berechnungsroutine nutzerfreundlich zu gestalten, wurden viele Algorithmen und Funktionen verbessert bzw. entwickelt.

- 1) Ein optimiertes Protokoll für den Datenaustausch zwischen Jena und Ilmenau (Biomechatronik resp. TETRA) wurde erstellt.
- 2) Passend zu diesem Protokoll wurden Algorithmen geschrieben, um die röntgenkinematographischen und dynamometrischen Daten aus Excel-Tabellen zu extrahieren. Sowohl die kinematischen als auch die dynamischen Daten werden individuell evaluiert, und dann synchronisiert. Dazu werden die dynamischen Daten interpoliert und gefiltert, z.B. wenn die Abtastungsfrequenz der Kraftmessung niedriger als die der kinematischen Daten ist. Die Routine erkennt auch Winkel und die Laufrichtung der Ratte (um die dynamischen und kinematischen Koordinatensysteme abzustimmen).
- 3) Winkelberechnungen wurden neu programmiert, um die ubiquitären Fehler bei der Nutzung der Arcus-Tangens-Funktionen (Sprung von 90° in -90° oder *vice versa*: 2D-Quadrantensprünge, 3D-Oktantensprünge) zu eliminieren. Dasselbe Funktionsmodul berechnet sowohl die absoluten als auch die Gelenkwinkel.

Berechnung der Nettokräfte mit Hilfe des LAGRANGE-Ansatzes

Das LAGRANGE-Modell für die Ratte (7 Segmente) wurde mathematisch formatiert und in Matlab® für “open chains” implementiert. Die Ergebnisse sind ermutigend und zeigen, dass Berechnungen der inversen Dynamik ohne Kontaktkräfte prinzipiell möglich sind. Nur auf Basis von kinematischen Daten wurden die Momente in Sprung-, Knie-, Hüft- und im T13-Gelenk geschätzt. Unter Nutzung von Lagrange-Multiplikatoren wurden auch die Kontaktkräfte berechnet. Die Methode ist jedoch sehr empfindlich gegenüber Variationen in den Beschleunigungen und kleinen Fehlern in den kinematischen Daten. In der Abbildung 24 (oben) werden die aus Newton-Euler- und Lagrange-Methoden gewonnenen Ergebnisse der Gelenkmomente einer Ratte beim Klettern unter einem Neigungswinkel von 60° verglichen. In der Abbildung 24 (unten) sind die vom Kraftmessstand gemessenen mit den mittels Lagrange-Multiplikatoren berechneten Kontaktkräften verglichen.

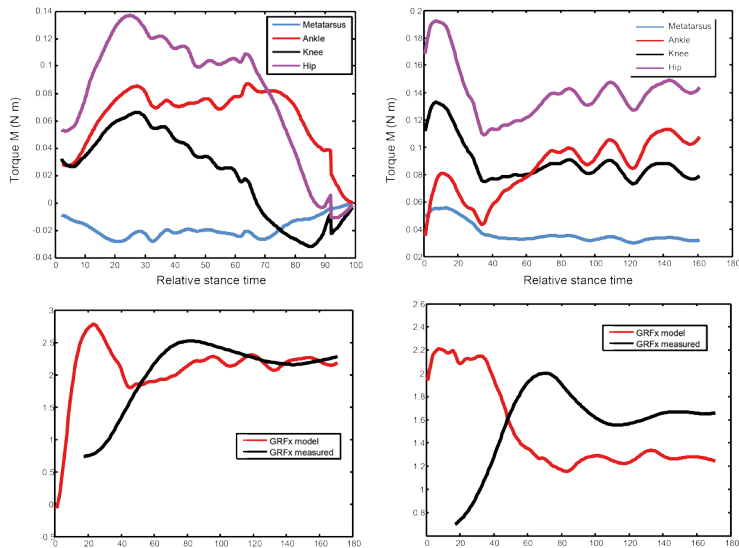


Abb. 24: Vergleich zwischen NEWTON-EULER- und LAGRANGE-Methode für die Berechnung der IDA. Oben links NEWTON-EULER, oben rechts Lagrange. Unten Vergleich zwischen den gemessenen und den aus Lagrange-Multiplikatoren berechneten Kontaktkräften.

Mit der Verfügbarkeit der zeitlich (bis 0,51 ms) und räumlich (0,1 mm) hochauflösenden neuen Röntgenanlage erscheint es erstmals machbar, bei der invers-dynamischen Analyse mit vertretbarem Fehler auf die externe (Substrat-)Kraftgrößenmessung zu verzichten, oder besser noch bei deren Verfügbarkeit auf zwei verschiedenen Wegen (NEWTON-EULER und LAGRANGE) die Kraftgrößen zu bestimmen und somit die Fehler besser als bisher möglich quantitativ einzugrenzen.

Das überraschendste Ergebnis der invers-dynamischen Berechnungen war, dass kletternde Ratten zumindest bei großen Substratneigungen etwa 85% der mechanischen Leistung in der Extremitätenmuskulatur und nur 15 % in der Rumpfmuskulatur wandeln (exakter: Netto-Leistung in den entsprechenden Gelenken. Da die Extremitätenmuskeln zum Teil ihren Ursprung auf dem Rumpf haben, wird tatsächlich eine höhere Leistung auf dem Rumpf gewandelt, aber in den Extremitäten freigesetzt). War die mechanische Struktur der „RatNics“ in der frühen Entwicklungsphase dem Leichtbau geschuldet (Konzentration der Massen weniger Aktoren in zwei Starrkörpern,

nachgiebige, leichte Transmission zum Erreichen der Relativkinematik), so erwies sich unsere Intuition bei der Gestaltung der Kletterroboter als unerwartet treffsicher: auch das biologische Vorbild „Ratte“ nutzt beim Klettern anders als aufgrund der ausgeprägten Rumpfmuskulatur zu erwarten Rumpf und Wirbelsäule vorrangig kinematisch zum Sichern eines großen Bewegungsraums, kinetisch spielt der Rumpf eine untergeordnete Rolle.

Dieses Ergebnis ist so überraschend wie für die Fachwelt provozierend, dass wir vor Publikation noch Kontrollexperimente durchführen werden. Hierfür sind – auch als Erfolg von InspiRat - alle technischen Voraussetzungen vorhanden.

Biologische Haftmechanismen, Identifikation der Kontaktmechanismen

Haften auf tubularen Substraten: Insekten (hexapod)

Die Haftfähigkeit von Insekten auf Oberflächen ist nicht nur mit den Mikro- und Nanostrukturen ihrer Haftorgane assoziiert, sondern in größerem Maßstab mit der Kinematik, welche für die Realisierung von Kontaktbildung und -lösung verantwortlich ist. Diesbezüglich wurden die Lokomotionstechniken verschiedener Vertreter mit unterschiedlichen Haftstrukturtypen aus vier Insektenordnungen (Orthoptera, Heteroptera, Coleoptera, Hymenoptera) beschrieben, basierend auf Videoaufnahmen laufender Insekten auf flachen Oberflächen und auf zylindrischen, Pflanzenstängel imitierenden Stäben verschiedener Dicke. Die Haftvorrichtungen der Tarsen und Prä-tarsen wurden mit einem Rasterelektronenmikroskop hoch auflösend betrachtet. Die Ergebnisse zeigen auf Substraten mit variierender Krümmung eine unterschiedliche Art und Weise, adhäsive Strukturen einzusetzen (vgl. Abbildung 25; GLADUN D. and GORB S.N. (2007) Insect walking techniques on thin stems. Arthropod-Plant Interactions. 1(2): 77-91).

Haften auf tubularen Substraten: Reptilien, Bsp. Chamäleon (quadropod)

Im Rahmen einer Diplomarbeit (Marlene Spinner) wurden 15 verschiedene Arten der Reptilienfamilie Chamaeleonidae - bekannt für ihre hervorragende Lokomotion und Haftung auf Ästen und Zweigen - auf Ihre Mikrostrukturierung der Körperoberfläche hin rasterelektronenmikroskopisch untersucht und verglichen. An den ventralen Seiten von Schwanz und Füßen finden sich *Setae*, die eine Haft- und Reibungsfunktion vermuten lassen (Abbildung 26). Bezüglich Habitatnutzung,

Verwandtschaftsbeziehungen, Körpergewicht und der Ausprägung der *Setae* konnten bislang keine Zusammenhänge herausgestellt werden. Drei Typen von *Setae* kristallisierten sich bei den diversen Arten heraus: spitz zulaufend, ohne *Spatula*, spitz zulaufend, abgeflacht (Übergangsform) und abgeflacht mit *Spatula*.

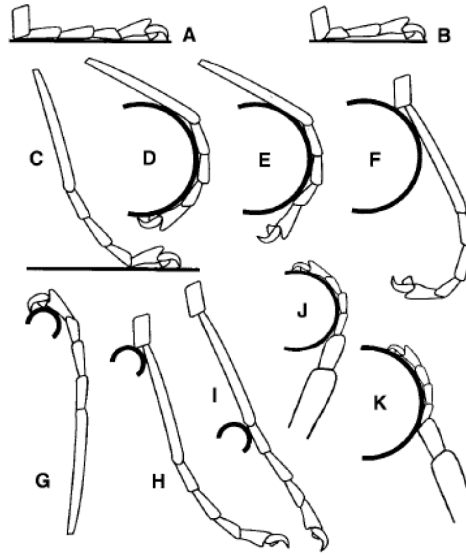


Abb. 25: Methoden der Beinpositionierung bei Insekten während des Laufens auf flachen Substraten und an Stäben. (A) Tarsus (TA) gerade, distaler Teil der Tibiae (TI), Prä-Tarsus (PT) und alle Tarsomeren (TMs) außer des ersten in Kontakt mit dem Substrat. (B) TA gerade, distaler Teil der TI, des PT und manchmal das basale TM in Kontakt mit dem Substrat. (C) TA ausgestreckt, nur der PT, das erste TM oder der distale Teil des zweiten TM berühren das Substrat. (D) TA gekrümmt, alle TMs (manchmal auch der distale Teil der TI) und die Klauen berühren das Substrat. (E) TA gekrümmt, alle TMs außer des distalen berühren das Substrat. (F) TA gekrümmt, nur die proximalen TMs (manchmal auch der distale Teil der TI) berühren das Substrat. (G) TA gekrümmt, unterstützt durch den PT und das distale TM. (H) TA ausgestreckt, proximale TMs (manchmal auch der distale Teil der TI) berühren das Substrat. (I) TA gerade oder leicht gekrümmt; berührt Substrat mit mittleren TMs. (J) TA gekrümmt, alle TMs außer des basalen berühren das Substrat. (K) Die Kette der TMs vom 1. zum 4. TM gekrümmt und gegen das Substrat gepresst, aber zur TI und basalen TM hin ausgerichtet. GLADUN, D. and GORB, S.N. (2007) Insect walking techniques on thin stems. *Arthropod-Plant Interactions* 1: 77-91.

Haften auf glatten und rauen Substraten, Bsp. Kartoffelkäfer

Viele Vertreter der Familie der Blattkäfer (Chrysomelidae), zu welcher der Kartoffelkäfer *Leptinotarsa decemlineata* gehört, zeigen einen sexuellen Dimorphismus in der Struktur ihrer Hafthaare (*Setae*) (Abbildung 27). Während Weibchen nur spatelförmige, lanzeolate und zugespitzte *Setae* besitzen, finden sich bei den Männchen auch solche mit discoiden Endplatten. So stellte sich die Frage, ob die Form der Hafthaare die Reibungskraft männlicher und weiblicher Kartoffelkäfer auf unterschiedlich rauen Oberflächen beeinflusst?

Die maximale Haftkraft der Käfer wurde auf glatten und rauen Kunstharzoberflächen mit einem Zentrifugalkrafttester gemessen. Auf der glatten Oberfläche waren keine beachtlichen Unterschiede zwischen Männchen und Weibchen zu beobachten. Auf den rauen Oberflächen jedoch hafteten die Weibchen signifikant, bis zum Zweifachen besser als die Männchen. Käfer mit amputierten Klauen generierten geringere Kräfte als solche mit intakten Klauen. Aber auch hier stellten sich ähnliche Unterschiede zwischen Männchen und Weibchen heraus.

Die Resultate lassen darauf schließen, dass das Haftsystem der Weibchen eine stärkere Spezialisierung auf raue Pflanzenoberflächen aufweist, während das der Männchen gewissen Kompromissen unterliegt. Es muss (a) der Haftung an der rauen Pflanzenoberfläche während der Lokomotion in der Vegetation und (b) der Haftung auf der glatten Oberfläche der Weibchen während der Paarung gleichermaßen gerecht werden (Abbildung 28).

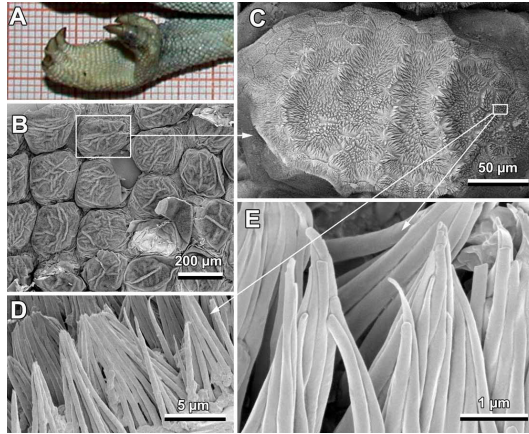


Abb. 26: Haftsystem der Chamaelonidae. A. Greiffuß, digitale Aufnahme (*Chamaeleo dilepis*). B-E. Rasterelektronenmikroskopische Aufnahmen. E. Ausschnitt der Fußoberfläche mit Schuppen (*Furcifer campani*). C. Einzelne mit Hafthaaren (Setae) bedeckte Schuppe im Detail (*Chamaeleo [Tiroceros] feae*). D, E. Setae im Detail (*Chamaeleo dilepis*). SPINNER, M., WESTHOFF, G. and S.N. GORB (2013) Subdigital and subcaudal microornamentation in Chamaeleonidae - A comparative study. J. Morphol. 274(6): 713–723.

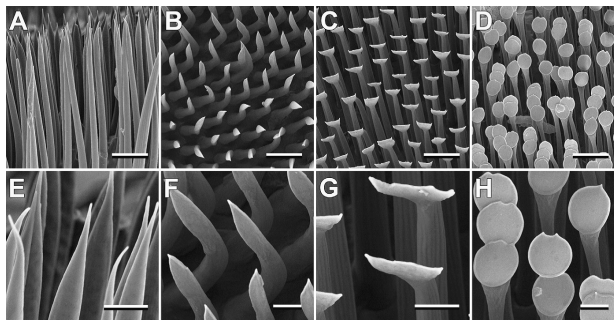


Abb. 27: Typen tarsaler Hafthaare bei *Leptinotarsa decemlineata*, Kryo-rasterelektronenmikroskopische Aufnahmen. A., E. Filamentös. B, F. Lanzeolat. C, G. Spatelförmig. Filamentöse, lanzeolate und spatelförmige wurden bei Weibchen und Männchen beobachtet. VOIGT, D.; SCHUPPERT, J. M.; DATTINGER, S.; GORB, S. N. 2008 J. Insect Physiol. 54: 765-776.

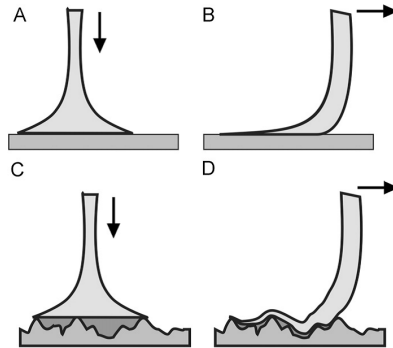


Abb. 28: Wirkungsweise der tarsalen adhäsiven Setae bei *Leptinotarsa decemlineata*.

Setae mit discoiden Endplatten (A, C) und spatelförmige Setae (B, D) auf einer glatten (A, B) und rauhen (C, D) Oberfläche. Die Pfeile deuten die Richtung der für die Kontaktbildung angewendeten Kraft an.

VOIGT, D.; SCHUPPERT, J. M.; DATTINGER, S.; GORB, S. N. 2008 J. Insect Physiol. 54: 765-776:

Kontaktbildung der terminaler Kontaktelemente, Bsp. Ampferblattkäfer

Erstmals wurden die terminalen Elemente (*Spatulae*) der haarigen Haftvorrichtungen der Käferart *Gastrophysa viridula* mittels Transmissionsröntgenmikroskopie (TRM) bei einer Auflösung von ca. 30 nm untersucht. Mit dieser Methode können frische biologische Materialien untersucht werden. Die angehefteten *Spatulae* wiesen ein viskoelastisches Verhalten auf, welches eine Ausweitung der Kontaktfläche und die Anpassung an die lokale Topographie der Oberfläche ermöglicht (Abbildung 29). Die hauchdünne, bandartige feine Struktur der *Spatula* legt sich über die Oberfläche. Die optische Dichte geht einher mit der Materialdicke, wenn man die gleiche Dichte des Materials der *Spatula* voraussetzt.

Die Technik kann potenziell als TRM-Tomographie angewandt werden, welche dreidimensionale Informationen liefert und einen tieferen Einblick in die Details der Kontaktbildung der Haftvorrichtungen der Insekten erlaubt. (EIMÜLLER, T.; GUTTMANN, P.; GORB, S. N. 2008 J. Exp. Biol. 211:1958-1963)

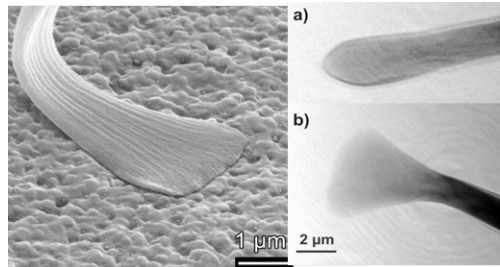


Abb. 29: Spatelförmiges Endkontaktelement des Käfers *Gastrophysa viridula* während des Kontaktes mit einer rauen Oberfläche. Links: Rasterelektronen-mikroskopische Aufnahme (REM). Rechts: Transmissionsröntgen-mikroskopie (TRM) Aufnahmen der Spatulae des Käfers *Gastrophysa viridula*. a) nicht in Kontakt, b) in frischem Kontakt mit einer glatten Si₃N₄ Membran. Beachte die Änderungen der Form und optischen Dichte der Spatulae.
EIMÜLLER, T.; GUTTMANN, P.; GORB, S. N. (2008) J. Exp. Biol. 211:1958-1963.

Kontaktbildung auf „kontaminierten“ Oberflächen: Visualisierung und Quantifizierung der Schmierschicht (Grease) auf Insektenkutikula

Die Wirkungsweise von Grenzflächenflüssigkeiten im Haftprozess bei Insekten und deren Bedeutung in biomimetischen Haftsystemen ist bislang nicht aufgeklärt. Da es sich um äußerst geringe Mengen und hauchdünne, teilweise flüchtige Schichten von Flüssigkeiten handelt, stellt allein deren mikroskopischer Nachweis eine große Herausforderung dar. Vor diesem Hintergrund wurden am Beispiel des Kartoffelkäfers Studien mit Kryo-Rasterelektronen (Kryo-REM)- und Rasterkraftmikroskop (AFM) durchgeführt (Abbildung 30).

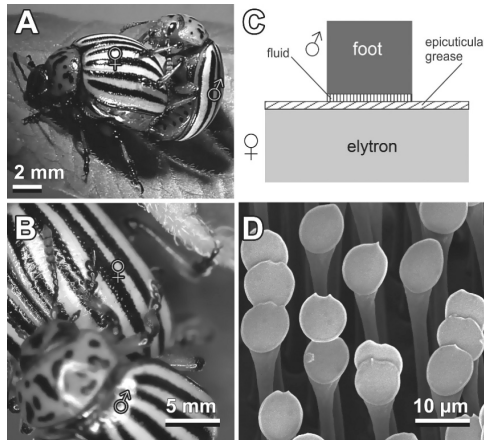


Abb. 30: Haftung im Paarungsverlauf des Kartoffelkäfers *Leptinotarsa decemlineata*.

A, B. Typische Paarungsposition, bei der die Füße der Männchen auf den weiblichen Flügeldecken haften. C. Hypothetisches Diagramm der Kontaktbildung zwischen den männlichen Hafthaaren am Fuß (foot) und den weiblichen Deckflügeln (elytron). Zwei Flüssigkeitsschichten zwischen der Kutikula der Hafthaare (fluid) und Deckflügel (epicuticular grease) sind involviert. D. Kryo-REM der männlichen Hafthaare.

VOIGT, D., PEISKER, H., and GORB, S.N. (2009) Visualization of epicuticular grease on the covering wings on the Colorado Potato Beetle: A scanning probe approach. In: Bhushan, B. and Fuchs, H. (Eds.). Applied scanning probe methods XIII. Heidelberg: Springer. pp. 1-16

Hafthaare männlicher Blattkäfer besitzen scheibenförmige Endkontakte (vgl. Abbildung 30 D) und inspirierten unlängst die Entwicklung eines effektiven Haftbandes mit pilzkopfförmigen Mikrostrukturen (S. Gorb, M. Varenberg, A. Peressadko, and J. Tuma. Biomimetic mushroom-shaped fibrillar adhesive microstructure. J. R. Soc. Interface 4 (13): 271-2756, 2006). Die männlichen Hafthaare sind für das Haften auf weiblichen Flügeldecken im Paarungsprozess (Abbildung 30 A, B) spezialisiert. Studien mit dem Kryo-REM ließen die Bedeckung der Flügeloberfläche mit einem mehr oder weniger kontinuierlichen Schmierfilm erkennen. Durch die Anwendung von drei verschiedenen Modi des AFM (Kontakt, Tapping, Phasenkontrast) konnte erstmalig gezeigt werden, dass das Schmiersekret vielmehr unregelmäßig verteilt ist und an erhabenen Stellen eine Höhe bis zu 8 nm erreicht (Abbildung 30). Darüber hinaus ermöglichte die AFM-Messtechnik die Ermittlung der Adhäsionskraft der Schmiersekretschicht von 28 nN. AFM ist demnach eine geeignete Methode,

Kutikulaschmierschichten nicht nur hoch aufgelöst zu visualisieren, sondern auch zu quantifizieren. Unter Berücksichtigung der neu gewonnenen Ergebnisse sollten Sekretschichten auf Substraten einen beachtlichen Einfluss auf die Haftung von Insekten ausüben, der künftig noch eingehender erforscht werden muss (Gorb et al. (2008) *Microscopy Today*, 16(3): 42-45 und Voigt et al. (2008) In: B. Bhushan and H. Fuchs (eds.) *Applied Scanning Probe Methods XIII. Biomimetics and Industrial Applications*. Heidelberg, Springer-Verlag: 1-16).

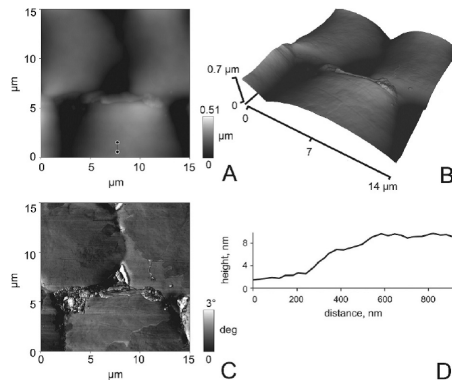


Abb. 31: AFM Tapping-Mode-Aufnahmen auf frischen weiblichen Flügeldecken von *Leptinoarsa decemlineata*. A: Höhenbild. B: Phasenbild von A, welches durch die Verwendung des Phasenkontrasts Unterschiede in den Oberflächeneigenschaften bzw. der Geometrie zeigt. Die Schmierschicht-verteilung (dunklere Stellen) auf einzelnen Zellen der Flügeldecken ist deutlich. C: 3D-Phasenbild veranschaulicht die Grenzen der Schmierschicht. D: Profil des Höhenbildes entsprechend eines Querschnittes durch die Schmierschicht entlang der Linie zwischen den Punkten in A.

VOIGT, D., PEISKER, H., and GORB, S.N. (2009) Visualization of epicuticular grease on the covering wings on the Colorado Potato Beetle: A scanning probe approach. In: Bhushan, B. and Fuchs, H. (Eds.). *Applied scanning probe methods XIII*. Heidelberg: Springer. pp. 1-16.

Kontaktmechanismen/Kinematik: Haftung und Lokomotion über Kopf an der Decke

Hausfliegen sind Meister im Laufen an Wand und Decken auf verschiedensten Oberflächen. Hochgeschwindigkeitsanalysen lassen eine spezifischen Haftungs- und Ablösungsperformance erkennen. Die Hafthaare an den Fliegenfüßen während des Kontaktes deformiert, um eine größere Kontaktfläche zu erzielen. Darüber hinaus sind typische Gangmuster zu erkennen (Abbildung 32).

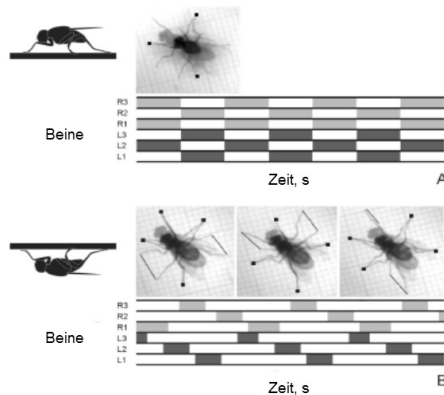


Abb. 32: Gangmuster der Hausfliege *Musca domestica*, auf einer Oberfläche (A), unter einer Oberfläche/an der Decke (B). Zwei Bilder wurden jeweils übereinander gelegt, um zwei nacheinander folgende Schritte zu zeigen. Schwarze Kästchen entsprechen den Füßen in Kontakt, graue Kästchen den Füßen in Bewegung

GORB, S. N. (2011) Biological fibrillar adhesives: functional principles and biomimetic applications. In: Handbook of Adhesion Technology. pp.1410-1436. Springer, Berlin, Heidelberg.

Läuft eine Fliege auf einer Oberfläche werden stets drei gegenüberliegende Beine bewegt, während die anderen drei Beine ruhig und in Kontakt bleiben (Tripod-Gang, Abbildung 32 A). **Auf einer vertikal ausgerichteten Oberfläche werden gleiche Muster verwendet.** Jedoch über Kopf an einer horizontalen Decke werden nur zwei Beine bewegt, während die anderen vier ruhig und in Kontakt bleiben (Abbildung 32 B).

Über Kopf an der Decke steht der Fliege somit ein zusätzlicher Kontaktpunkt zur Verfügung, der in dieser exponierten Position von Vorteil zu sein scheint. Somit entsteht ein optimiertes Verhältnis von Körpergewicht und unterstützender Kontaktfläche.

Diese Ergebnisse lassen darauf schließen, dass das Gangmuster zum erfolgreichen Laufen der Fliegen unter einer Oberfläche beiträgt. Diese Erkenntnisse sind von entscheidender Bedeutung für die Umsetzung eines über Kopf laufenden Roboters.

Kontaktmechanismen/Kinematik: In die Haftung involvierte Prinzipien und Effekte

Haftmechanismen im Tierreich unterliegen bestimmten Prinzipien und beteiligten Effekten (Abbildung 33). An Decken und Wänden laufende Insekten, Spinnen oder Geckos tragen **haarige oder glatte Haftpolster** an ihren Beinen. Während das dynamische Haften bei Spinnen und Geckos hauptsächlich durch **Van-der-Waals-Kräfte** bewirkt wird, treten bei Fliegen und Käfern **Kapillarkräfte** in den Vordergrund. Letztere scheiden an ihren Füßen haftvermittelnde Sekretionen aus, deren Funktion und Bedeutung im Haftprozess gegenwärtig nicht vollständig aufgeklärt ist.

Die **Geometrie der Hafthaare** ist Schlüsselfaktor für den Hafterfolg auf verschiedenen Oberflächen. Während beispielsweise spatula-förmige Hafthaare gut auf rauen Oberflächen haften, erweisen sich pilzkopfförmige auf glatten Substraten als besser geeignet.

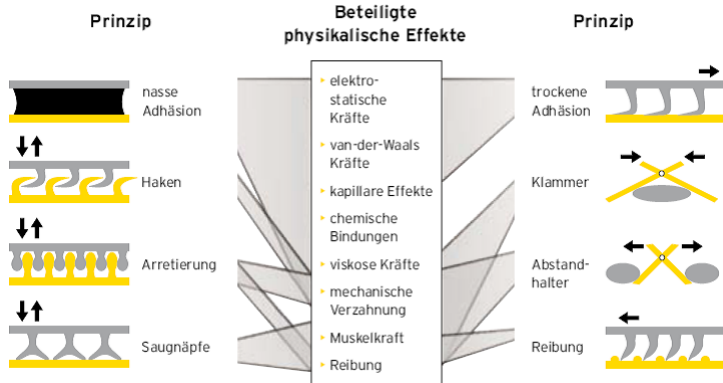


Abb. 33: Funktionelle Prinzipien biologischer Haftsysteme und beteiligte physikalische Effekte.

GORB, S.N. (2008) Biological attachment devices: exploring nature's diversity for biomimetics. Phil. Trans. R. Soc. Lond. A, 366: 1557-1574.

Zusätzliche kontinuierliche **Scherbewegungen** bringen das Haftsystm in engen Kontakt mit dem Substrat und garantieren eine sichere Haftung. Nicht die Andruckkraft ist allein entscheidend, sondern vielmehr die horizontale Reibungskraft durch die Scherbewegungen.

Abbildung 34 zeigt eine stark vereinfachte Übersicht zu oben erwähnten Parametern. Im folgenden Projektverlauf erfolgte eine schematische vergleichende Aufstellung der Einflussparameter und deren Interaktion für verschiedene Haftpositionen.

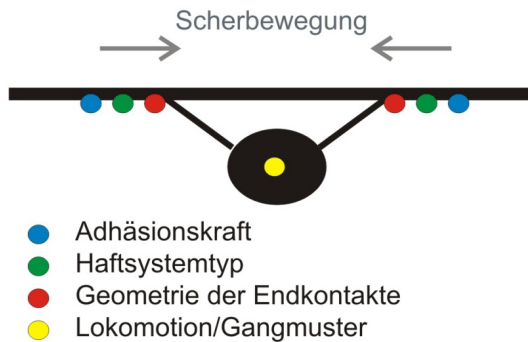


Abb. 34: Entscheidende Parameter für ein erfolgreiches Haften über Kopf unter horizontalen Oberflächen. Abstrahiertes Insekt und entsprechende Eigenschaften farblich markiert.

Letztendlich sind außerdem auch die konkreten Mechanismen der Bildung und Lösung des Kontakts zu berücksichtigen (GORB & VOIGT (2010) Funktionale biologische Oberflächen als Vorbilder für die Technik. Performance, Doppelausgabe 2.2009|1.2010: 68-77).

Zuverlässige Haftung in Extremfällen

Insekten scheinen nicht nur den Kompromiss zwischen zuverlässiger Haftung und ungehinderter Bewegung erfolgreich zu meistern, sondern sie setzen ihre Haftorgane gezielt energie- und materialsparend ein. Die so genannten Gladiatoren (Arten der Insektenordnung Mantophasmatodea) besitzen besonders ausgeklügelte Haftsystme bestehend aus behaarten Haftkissen (*Euplantulae*) und einem zusätzlichen Haftlappen (*Arolia*) unmittelbar in Krallennähe (Abbildung 35). Die Morphologie und

Funktion des letzteren war bislang nicht aufgeklärt und wurde eingehend untersucht. Verschiedene Methoden wurden kombiniert: Licht-, Rasterelektronen-, und Transmissionsmikroskopie, Hochgeschwindigkeitsanalysen.

Das *Arolium* ist größer und komplexer gebaut als fast in allen anderen Insektengruppen. Es kann in sehr schnellem Reflex (18 ms) mit dem Substrat in Kontakt gebracht werden.

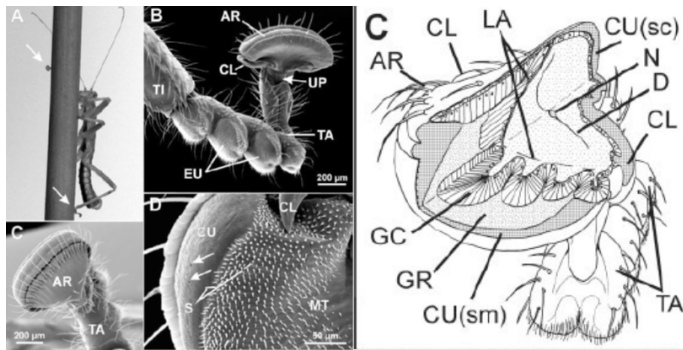


Abb. 35: Betrachtungsebenen von Makro bis Nano: A: Ein Vertreter der Ordnung Mantophasmatodea in seiner gewöhnlichen Lauf oder Pausierungsposition, bei denen das Arolium stets von der Oberfläche abgehoben bzw. zum Körper hin abgewinkelt ist. B: Rasterelektronenmikroskopische Aufnahme des Fußes. Fußsegmente 1-4 mit haarigen Euplantulae, während das 5. Segment mit Arolium und Krallen hoch-, vom Substrat weggehalten wird. C: Dorsalansicht des Aroliums mit weicher Kutikula an den distalen Rändern. D: Detail der distalen ventralen Seite des Aroliums (Pfeile); E: Schematische Zeichnung des Fußes nach dem Vorbild von transmissionselektronenmikroskopischen Aufnahmen. AR, Arolium; CL, Krallen; CU, Kutikula; D, Diaphragma; EU, Euplantulae; GC, Drüsenzellen; GR, Drüsenreservoir; LA, Lamina; MT, Mikrotrichia; N, Nerv; S, trichoide Sensillen; (sc), sklerotisiert; (sm) smooth; TA, Fuß; TI, Beinschiene; UP, Fußplatte.

EBERHARD, M.J.B., PASS, G., PICKER, M.D., BEUTEL, R., PREDEL, R., and GORB, S.N. (2009) Structure and function of the arolium of Mantophasmatodea (Insecta). *J. Morphol.*, 270 (10): 1247-1261

Die Ergebnisse deuten darauf, dass der Haftlappen (*Arolium*) der „Gladiatoren“ nur benutzt wird, wenn zusätzliche Adhäsionskraft erforderlich ist, z. B. unter extremen Bedingungen (Wind, Körperposition). Unter „Normalbedingungen“ wird diese hoch-effektive, weiche und adaptive Haftstruktur vom Substrat abgewinkelt, um einerseits ihren Verschleiß zu vermindern und andererseits ein zu starkes Anhaften im Lokomotionsprozess zu vermeiden. Eine solche (Sicherheits-)Haftstruktur könnte ebenso für deckenlaufende Roboter von Interesse sein (EBERHARD, M.J.B., PASS, G., PICKER, M.D.,

BEUTEL, R., PREDEL, R., and GORB, S.N. (2009) Structure and function of the arolium of Mantophasmatodea (Insecta). J. Morphol., 270 (10): 1247-1261.

Adhäsive Eigenschaften glatter Haftsyste

Parameter glatter Haftsyste

Haftmechanismen im Tierreich unterliegen bestimmten Prinzipien und beteiligten Effekten. Basierend auf der breit angelegten Literaturrecherche und Analyse von eigenen Studien haben wir solche Prinzipien und Effekten in einer Schema zusammengefasst, in welchem wir detailliert auf die Funktionalität und beteiligte Parameter von glatten Haftsyste

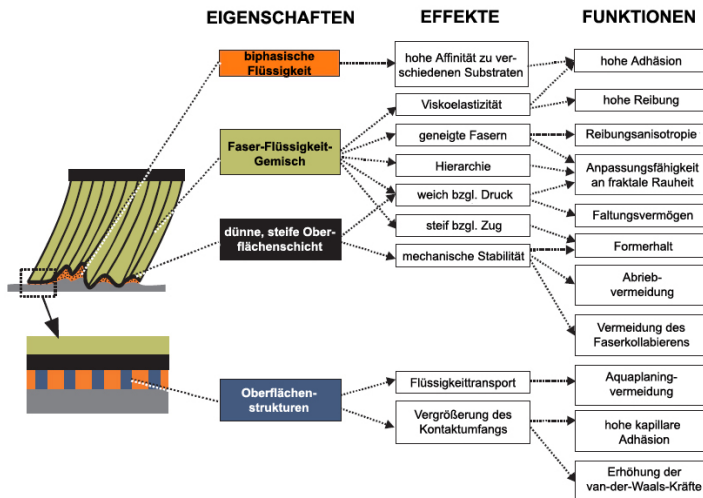


Abb. 36: Parameter in glatten Haftsyste: Eigenschaften, bewirkte Effekte und erfüllte Funktionen. GORB, S.N. (2008) Smooth attachment devices in insects. In: Casas, J. and Simpson, S.J. (Eds.) Advances in Insect Physiology: Insect Mechanics and Control. Elsevier Ltd., Academic Press, London. 34: pp. 81-116.

Haften glatter Haftsysteme auf glatten Substraten

Während des Screenings geeigneter Haftmaterialien für die InspiRat-Füße kristallisierten sich vor allem „schaumige“ Materialien als geeignet heraus. Somit wurden in die Exploration biologischer Haftsysteme verstärkt auch sogenannte glatte Haftsysteme einbezogen, wie das Arolium der Zikade *Lycorma delicatula* (Abbildung 37). Solche Haftsysteme ließen schon in Vorstudien unterstützende innere Strukturen vermuten. Die Basis der Terminalfläche des Zikadenaroliums bildet korrugate, parasagittale Falten aus. Diese werden durch innere kutikuläre Dendriten unterstützt.

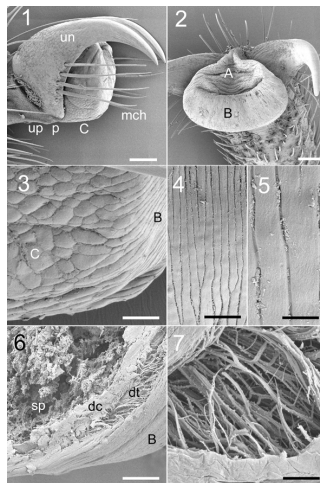


Abb. 37: Rasterelektronenmikroskopische Aufnahmen des Prätersus von *Lycorma delicatula*:

1. Profil. 2. Vorderansicht. 3. Übergang von der Unterseite (C), bedeckt mit flachen Schuppen, zur Endlippe. mit vertikalen Riefen (B). 4, 5. Vertikale Riefen auf der Endplatte. 6. Querschnittenes Arolium, gleiche Zone wie in 3. 7. Dendritenschicht.

A. Dorsale Oberfläche des Aroliums. B. Terminale klebrige Lippe. C. Untere Oberfläche des Aroliums. dc – dichte Kutikulaschicht; dt – Dendritenschicht; mch – Setae; p – Planta; sp – schwammige Masse; un – Krallen; up – Unguitraktorplatte. Maßbalken: 100 µm (1, 2), 20 µm (4, 6), 10 µm (3), 5 µm (5), 2 µm (7).

FRANTSEVICH, L., JI, A., DAI, Z., WANG, J., FRANTSEVICH, L., and GORB, S.N. (2008) Adhesive properties of the arolium of a lantern-fly, *Lycorma delicatula* (Auchenorrhyncha, Fulgoridae). J. Insect Physiol., 54: 818-827.

Die Seitenflächen des *Aroliums* bilden sklerotisierte dorso-laterale Platten. Wenn die Klauen auf einer glatten Oberfläche gleiten, dehnen sich die dorso-lateralen Platten aus und erweitern die haftende Endfläche. Die reale Kontaktfläche mit einer Glasplatte wurde durch Lichtreflexion an den Randflächen bestimmt. Die Fläche wurde gemessen. Sie war kleiner, wenn das Bein im rechten Winkel an das Substrat gedrückt wurde ($0,02 \text{ mm}^2$) als wenn es in paralleler Richtung zum Substrat geschert wurde ($0,05 \text{ mm}^2$). Die Haftkräfte wurden mit Hilfe einer dynamometrischen Plattform gemessen, während die Insekten aktiv an horizontalen oder vertikalen Glasoberflächen zogen. Die normale Adhäsionskraft (ca. 9 mN - 12 mN) war viel geringer als die Reibungskraft während des Gleitens mit einer Geschwindigkeit von $6 \text{ mm}^{\text{s}^{-1}}$ - $17 \text{ mm}^{\text{s}^{-1}}$ (50 mN - 100 mN). Ausgedrückt als Kraft pro Kontaktflächeneinheit war der Unterschied deutlicher: $170 \text{ mN} \cdot \text{mm}^{\text{s}^{-1}}$ bzw. $375 \text{ mN} \cdot \text{mm}^{\text{s}^{-1}}$ - $625 \text{ mN} \cdot \text{mm}^{-2}$. Das Gleiten des *Arolium* während des Scherens erwies sich in einer Standbild-Videoanalyse als oszillatorisch. Die relativen Oszillationen bestanden aus periodischen sticks-slips (Rutschgleiten) des *Arolium* entlang der Glasoberfläche (Abbildung 38). (FRANTSEVICH, L.; Ji, AIHONG; Dai, Z.; WANG, J.; FRANTSEVICH, L.; GORB, S. N. 2008 J. Insect Physiol. 54: 818-827.)

Die Materialstruktur des Zikadenaroliums scheint für die Anpassung an verschiedene Substrate und die Generierung der Reibungs- und Adhäsionskräfte besonders geeignet zu sein. Diese Erkenntnisse zeigen deutlich, dass wir uns bei der Auswahl geeigneter InspiRat-Haftmaterialien nicht nur auf die Mikrostrukturierung von Polymeroberflächen, sondern auch auf die Benutzung polymerischer Schaumstoffe konzentrieren mussten. Eine Kombination der Oberflächenstrukturen und einer inneren porösen/faserigen Materialstruktur ist für die gesuchte Funktion als Hand-/Fußbelag des Roboters von großem Interesse.

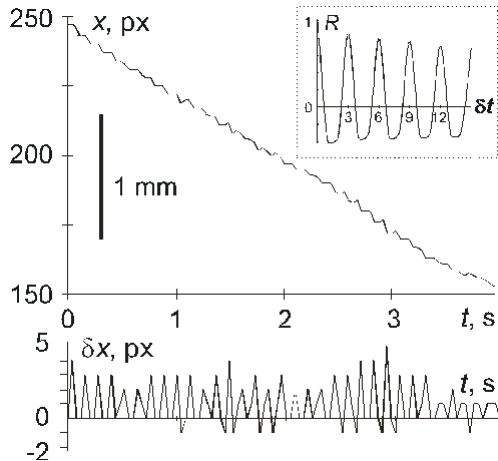


Abb. 38: Stick-slip-Verhalten des Aroliums auf einer Glasplatte. Der obere Graph zeigt die Aroliumbewegung x in Pixel aufgetragen über der Zeit t (Auswahl von 1000 Standbildern, Maßbalken: 1 mm). Der untere Graph zeigt die Standbild-zu-Standbild Verschiebung δx in Pixeln aufgetragen über der Zeit. Das eingefügte Bild oben rechts zeigt die Autokorrelation der Standbild-zu-Standbild Verschiebung ausgedrückt als linearer Korrelationskoeffizient R aufgetragen über die Zeitverzögerung δt , welche statistische Periodizität aufweist. Die Berechnung der Autokorrelation basiert auf 374 Standbildern.

FRANTSEVICH, L., JI, A., DAI, Z., WANG, J., FRANTSEVICH, L., and GORB, S.N. (2008) Adhesive properties of the arolium of a lantern-fly, *Lycorma delicatula* (Auchenorrhyncha, Fulgoridae). *J. Insect Physiol.*, 54: 818-827.

Haften glatter Haftsysteeme auf rauen Oberflächen

Unscheinbare Kleinschmetterlinge wie der Apfelwickler (*Cydia pomonella*) tragen an ihren Füßen eindrucksvolle Haftvorrichtungen, mit denen sie auf Substraten mit großer Strukturvielfalt haften können (Abbildung 38). Die Haftfähigkeit solcher Strukturen und die entsprechenden funktionellen Effekte wurden für diese Tiere vorher nicht untersucht.



Abb. 39: Ventrale Ansicht des sich an einer Glasoberfläche über Kopf festhaltenden Weibchens des Apfelwicklers.

AL BITAR, L., VOIGT, D., ZEBITZ, C.P.W., and GORB, S.N. (2010) Attachment ability of the codling moth *Cydia pomonella* L. to rough substrates. *J. Insect Physiol.* 56: 1966-1972.

An den Fußspitzen sitzen zwei gebogene und zugespitzte Krallen, zwischen denen ein ein- und ausfaltbares, so genanntes Sohlenblässchen (*Arolium*) gelagert ist. Letzteres bedecken zwei haarige Lappen (*Pulvilli*), hinter denen es nur im ausgefalteten Zustand hervortritt (Abbildung 39).

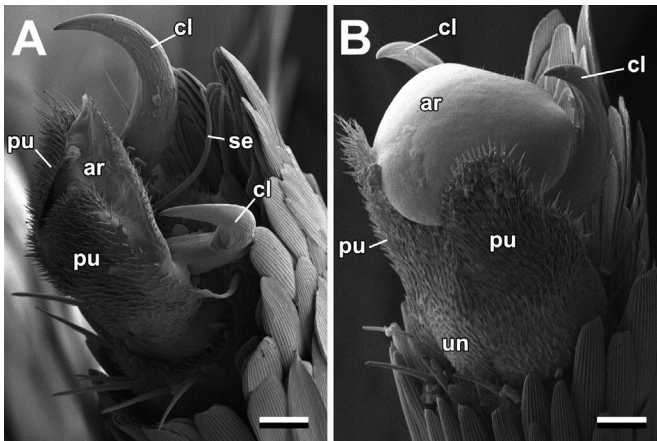


Abb. 40: Kryo-rasterelektronenmikroskopische Aufnahmen des Fußes von *Cydia pomonella*.

(A) Lateroventrale Ansicht des dicht mit Schuppen bedeckten 5. Tarsomers und des Prätarsus mit eingefaltetem Arolium. (B) Ventrolaterale Ansicht mit ausgefaltetem Arolium. cl, Krallen; ar, Arolium; pu, Pulvilli; un, Unguitractor; se, seta. Maßbalken: 20 µm.

AL BITAR, L., VOIGT, D., ZEBITZ, C.P.W., and GORB, S.N. (2010) Attachment ability of the codling moth *Cydia pomonella* L. to rough substrates. *J. Insect Physiol.* 56: 1966-1972.

Die detaillierte Morphologie der Apfelwicklerfüße sowie die Haftung auf horizontalen, vertikalen, hydrophilen und hydrophoben Glas- und Plexiglasoberflächen wurde studiert und dokumentiert. Die Motten zeigten sicheres Haftvermögen auf all diesen Oberflächen.

Die Experimentalreihen mit der bewährten und in vorigen Berichten beschriebenen Zentrifugalkraftmesstechnik wurden nunmehr mit definierten rauen Oberflächen fortgesetzt und resultierten in den in Abbildung 41 dargestellten Daten.

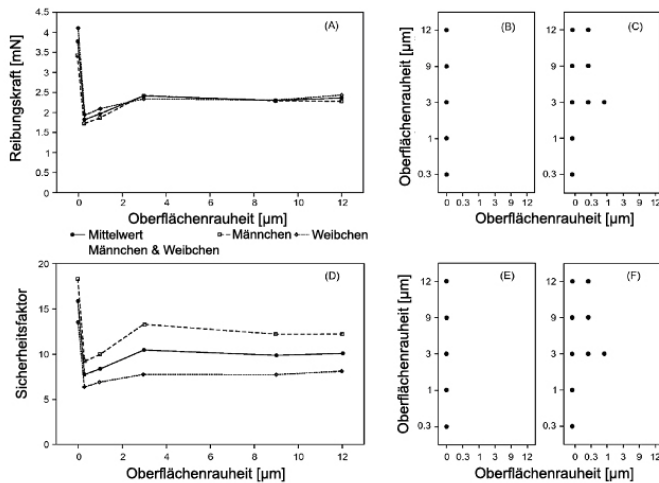


Abb. 41: Reibungskräfte (Mittelwerte) (A-C) und Sicherheitsfaktoren (Mittelwerte) (D-F) von Apfelwicklern (*Cydia pomonella*), Männchen und Weibchen, gemessen auf unterschiedlich rauen Harzoberflächen in Zentrifugalkraftexperimenten. Punkte in B, C, E und F indizieren signifikante Unterschiede zwischen den Reibungskräften (B, C) und Sicherheitsfaktoren (E, F), für Weibchen (B, E) und Männchen (C, F) (einfaktorielle Varianzanalyse; Reibungskräfte: $F = 23,0$, $p < 0,0001$ für Weibchen; $F = 25,6$, $p < 0,0001$).

AL BITAR, L., VOIGT, D., ZEBITZ, C.P.W., and GORB, S.N. (2010) Attachment ability of the codling moth *Cydia pomonella* L. to rough substrates. J. Insect Physiol. 56: 1966-1972.

Während der Einfluss auf die Haftkraft haariger Haftsysteime in der Vergangenheit schon studiert wurde, lagen für glatte Systeme – wie bei *Cydia pomonella* - bislang nur ganz wenige Daten vor. Ähnlich den Vertretern mit haarigen Haftsysteimen generieren Apfelwicklermotten auch auf glatten Substraten die größten Haftkräfte und finden in einem Bereich zwischen 0 und 1.0 µm Rauigkeit den schlechtesten Halt.

Allerdings ist die relative Reduktion der Kräfte bei den Motten mit ca. 50 % viel geringer als z. B. bei Kartoffelkäfern (95 %). Die Haftkraft der Motten auf den getesteten rauen Oberflächen ist signifikant geringer als auf der glatten, was wir damit begründen, dass die Krallen der Tiere unter den Versuchsbedingungen erst bei noch raueren Oberflächen zum Einsatz kommen und die Arolien auch auf mikro-rauen Oberflächen haften. Eine andere Erklärung kann in Ausprägung der Rauheit, d. h. dem Aspektverhältnis oder der Anordnung der Körnungen gesucht werden.

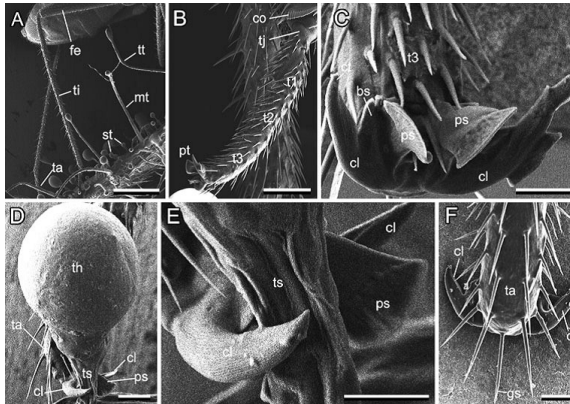


Abb. 42: Kryo-Rasterelektronenmikroskopische Aufnahmen der Haftvorrichtung der südafrikanischen Weichwanze *Pamphila roridulae*. A: Hinterleib und Hinterbeine eines Weibchens auf einer klebrig behaarten Pflanzenoberfläche im Bild. B: Tarsus. C: Prätarsus. D, E: Prätarsus, Krallen ein glanduläres Pflanzenhaar umfassend. Die Mitte des Haarstängels wird mit einem Teil der paarigen Krallen umgriffen, so dass er zwischen Krallenwölbung, basaler Krallenausstülpung (bs) und dem Haftpad (Pseudopulvilli) geklemmt wird. F: Prätarsus auf einer glatten Oberfläche haftend. Hierzu werden die Krallen gespreizt und abgeklappt, damit die paarigen Haftklappen (Pseudopulvilli) in den adhäsiven Kontakt mit der Oberfläche ausbilden können.

(bs) basale Krallenausstülpung; (cl) Krallen; (co) Putzkamm; (ct) Klauenzahn; (fe) Femur; (gs) Schutzborste; (mt) mittellange Pflanzenhaare; (ps) Pseudopulvillus; (pt) Prätarsus; (st) kurze Pflanzenhaare; (ta) Tarsus; (t1) erstes Tarsomer; (t2) zweites Tarsomer; (t3) drittes Tarsomer; (th) Drüsenkopf des Pflanzenhaares; (ts) Pflanzenhaarstängel; (tt) tentakelförmiges Pflanzenhaar; (ti) Tibia; (tj) Tibia-Tarsus-Gelenk. Maßstäbe: A = 1,000 µm; B, D = 50 µm; C, E, F = 20 µm.

VOIGT, D. and GORB, S.N. (2010) Locomotion in a sticky terrain. *Arthropod-Plant Interactions* 4: 69-79.

Betrachtet man die Sicherheitsfaktoren, die Vielfachen des eigenen Körpergewichts, mit welchen die Tiere den Zentrifugalkräften standhalten können, erreichten die Motten mit maximal dem 18fachen geringere Werte als Kartoffelkäfer (max. 70faches), was sicherlich in der Biologie und Ökologie der Tiere begründet liegt. Doch die Haftkraft glatter Haftsyste (Apfelmotten) ist nicht ohne weiteres mit derjenigen haariger Haftsyste (Kartoffelkäfer) vergleichbar.

Zusammenfassend sind die Füße der Apfelwicklermotten beispielgebende Systeme, die in der Entwicklung des Haftmaterials für die Roboterfüße intensiv diskutiert wurden. Die gleichzeitige Bereitstellung von Verhakungsmechanismen und glatten, weichen Haftkissen als auch die Schonung der spezialisierten Haftkissen und deren Ausfaltung nur im Bedarfsfall gibt Anregungen für sparsam verwendete Materialien mit universellem, nachhaltigem Einsatz auf diversen Substraten (Al Bitar, Voigt, Zebitz & Gorb 2010 J. Insect Physiol. 56: 1966-1972).

Glatte Haftsyste: Lokomotion und Verhaken auf pubeszenten Oberflächen

Kenntnisse der Haftmechanismen von Wanzen auf behaarten Pflanzen tragen zur Aufklärung des Krallenmechanismus für das Roboterklettern an Baumstrukturen bei (Abbildung 43).

Zugkraftversuche auf haarigen Pflanzensubstraten und glatten Oberflächen zeigen, dass die Wanzen fähig sind, auf beiden Oberflächentypen hinlänglich zu haften und sich fortzubewegen (Abbildung 43). Die von der Wanze *Pameridea roridulae* generierten Zugkräfte auf behaarten Pflanzenoberflächen entsprechen dem 127fachen ihres Körpergewichtes und auf Glas dem 47fachen ihres Körpergewichtes. Die Wanzen nutzen einerseits paarige Krallen, um sich mit einzelnen Pflanzenhaaren zu verklammern und andererseits zwei weiche Haftpads (*Pseudo-Pulvilli*), die der Adhäsion auf glatten Oberflächen dienen und haften auf beiden Oberflächentypen in jeglicher Körperposition. Eine solche Kombination ist auch für das multifunktionale Klettern des Inspektionsroboters einschließlich seines Einsatzes in Baumkronen anzudenken (VOIGT, D. and GORB, S.N. (2010) Locomotion in a sticky terrain. Arthropod-Plant Interactions 4: 69-79).

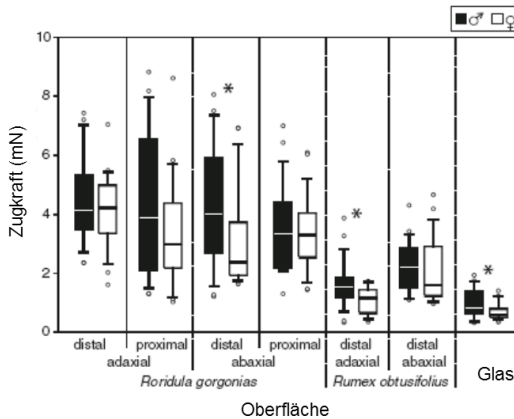


Abb. 43: Von der Weichwanze *Pameridea roridulae* im Zugexperiment generierte Kräfte auf der behaarten Pflanzenoberfläche von *Roridula gorgonias* und der unbehaarten Pflanzenoberfläche *Rumex obtusifolius* und Glas.

VOIGT, D. and GORB, S.N. (2010) Locomotion in a sticky terrain. Arthropod-Plant Interactions 4: 69-79.

Glatte Haftsysteeme: Haften auf horizontalen und vertikalen glatten Oberflächen - Sonderfall Pflanzenwespenlarven, multiple Kontaktpunkte

Larven der Pflanzenwespenart *Rhadinoceraea micans* halten sich hervorragend auf der antiadhäsiven Oberfläche von Wasserschwertlilien (*Iris pseudacorus*) fest (Abbildung 44).

Dazu benutzen sie drei Paar Füße am Vorderleib und sieben Paar am Hinterleib sowie ein paariges *Pygopodium* am Hinterleibende. In Zentrifugalkraftexperimenten hafteten die Tiere auf hydrophilen und hydrophoben Untergründen in horizontaler (Reibung) und vertikaler (Adhäsion) Richtung. Dabei erzielten sie Kraftwerte bis zum 25fachen (Reibung) und 8fachen (Adhäsion) des eigenen Körpergewichts (sog. Sicherheitsfaktoren). Die Reibungskräfte waren stärker, wenn sich die Larven quer zur Rotationsrichtung der Zentrifugentrommel befanden (21).

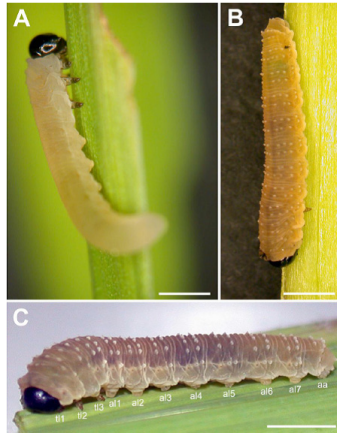


Abb. 44: Larven der Pflanzenwespen *R. micans* haften in jeglicher Körperposition auf der Oberfläche ihrer Wirtspflanzen *Iris pseudacorus*.

VOIGT, D. and GORB, S. N. (2012) Attachment ability of sawfly larvae to smooth surfaces. *Arthropod Struct. Dev.* 41:145-153.

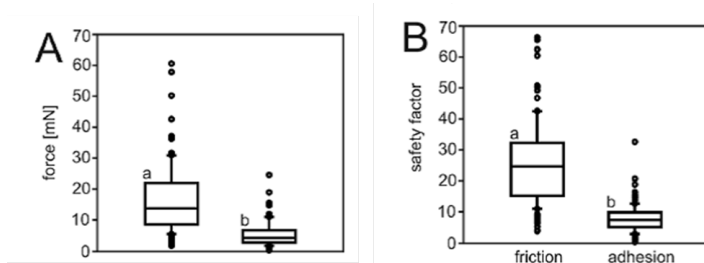


Abb. 45: Gemessene Kräfte (force) (A) und Sicherheitsfaktoren (B) von *R. micans*-Larven in horizontaler (Reibung/friction) und vertikaler (Adhäsion/adhesion) Position auf einer polierten Plexiglastrommel auf dem Zentrifugalkrafttester. Die Boxen definieren 25. und 75. Perzentil mit Medianlinie und Fehlerbalken, welche das 10. und 90. Perzentil anzeigen. Signifikante Unterschiede zwischen den Werten zeigen unterschiedliche Buchstaben (MANN-WHITNEY Rangsummentest; Kraft/force: $T = 13766$, $p \leq 0,001$; Sicherheitsfaktor/safety factor: $T = 14204$, $p \leq 0,001$).

VOIGT, D. and GORB, S. N. (2012) Attachment ability of sawfly larvae to smooth surfaces. *Arthropod Struct. Dev.* 41:145-153.

Dem *Pygopodium* am Hinterleibsende wird eine Schlüsselrolle der sicheren Haftung in Ausnahmesituationen (z. B. über Kopf) zugeschrieben, was für Roboterdesigns von ausschlaggebendem Interesse sein dürfte (VOIGT; GORB 2011 Arthr. Str. Dev., eingereicht).

2.1.5 Entwicklung, Realisation, Optimierung und Dokumentation technischer Kontaktmechanismen

Performance von bio-inspiriertem Haftband: Adhäsion auf Glas

Biomimetische pilzförmige adhäsive Mikrostrukturen wurden mittels einer Vielfalt von Messtechniken charakterisiert und mit einer flachen, unstrukturierten Kontrolloberfläche desselben Materials verglichen. Die Ergebnisse zeigen eine mehr als zweifach höhere Abzugskraft und Haftfestigkeit bei strukturierten Proben im Vergleich zu flachen Proben (Abbildung 46).

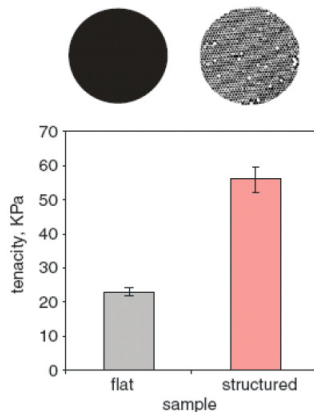


Abb. 46: Ergebnisse der Adhäsionstests zweier verschiedener PVS-Proben (flat, flach; structured, strukturiert) entsprechend dem Flach-zu-Flach Schema. Die „Zähigkeit“ oder Adhäsionskraft pro Kontaktfläche (tenacity) spiegelt die Adhäsion normalisiert zu den realen Kontaktflächen zwischen Polymerprobe und Glas wider.

GORB S.N., SINHA M., PERESSADKO A., DALTORIO K.A. and QUINN R.D. 2007 Insects did it first: a micropatterned adhesive tape for robotic applications. *Bioinspiration and Biomimetics*. 2: 117–125.

Basierend auf der Kombination verschiedener geometrischer Prinzipien bei biologischen Haftvorrichtungen, stellen die aufgezeigten Mikrostrukturen einen bedeutenden Schritt auf dem Weg der Entwicklung industrieller trockener Haftmaterialien dar. (Gorb S.N., Sinha M., Peressadko A., Daltorio K.A. and Quinn R.D. 2007 Insects did it first: a micropatterned adhesive tape for robotic applications. Bioinspiration and Biomimetics. 2: 117–125).

Performance von bio-inspiriertem Haftband: Adhäsion auf verschmutzten Oberflächen

Im Gegensatz zu flachem Haftband desselben Materials zeigt sich das strukturierte sehr tolerant gegenüber Kontamination. Es kann seine adhäsiven Eigenschaften nach Waschen in Seifenlösung wiedererlangen (Abbildung 46). (Gorb S.N., Sinha M., Peressadko A., Daltorio K.A. and Quinn R.D. 2007 Insects did it first: a micropatterned adhesive tape for robotic applications. Bioinspiration and Biomimetics. 2: 117–125.)

Performance von bio-inspiriertem Haftband: Adhäsion unter Wasser

Mit den pilzförmigen adhäsiven Mikrostrukturen konnte eine klebstofffreie reversible Adhäsion unter Wasser erzielt werden. Die strukturierten Oberflächen wiesen unter Wasser einen 25 %igen Anstieg der Ablösekraft auf. Ihre Unterwasserhaftung war 20fach höher als diejenige der flachen Oberflächen (Abbildung 47). Die van-der-Waals Wechselwirkung, welche der Adhäsion der pilzförmigen fasrigen Mikrostruktur unterliegt, wird unter Wasser signifikant durch mögliche Saugeffekte erhöht. Dies resultiert in einer höheren Haftfähigkeit des Materials mit potentiellen unter-Wasser-Anwendungen in Robotik, Medizin, Bio- und marine Technologien sowie einer Spannbreite anderer Applikationen in wässrig dominierten Millieu. (Varenberg, M. and Gorb, S.N. (2008) A beetle-inspired solution for underwater adhesion. J. R. Soc. Interface 5 (20): 383-385).

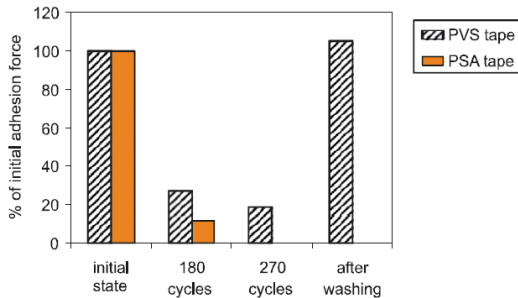


Abb. 47: Änderung der Performance von strukturierten (PVS) und unstrukturierten (PSA) Haftbändern (% of initial adhesion force = % der ursprünglichen Haftkraft) in Abhängigkeit vom Kontaminationsgrad; nach erstmaligem Haften (initial state), nach unterschiedlicher Anzahl von Haftzyklen (180, 270 cycles) und nach dem Waschen in Seifenlösung (after washing) (5 Haftbänder jeden Typs getestet).

GORB S.N., SINHA M., PERESSADKO A., DALTORIO K.A. and QUINN R.D. 2007 Insects did it first: a micropatterned adhesive tape for robotic applications. *Bioinspiration and Biomimetics*. 2: 117–125.

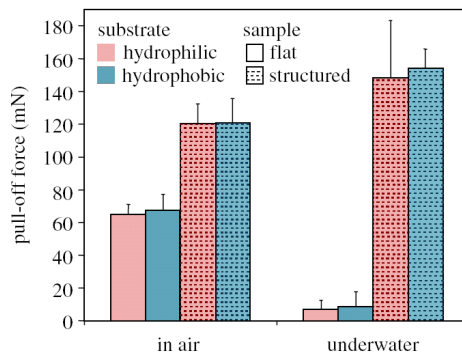


Abb. 48: Performance pilzförmiger adhäsiver Mikrostrukturen in Luft und unter Wasser.

Mittlere Ablösekraft (pull-off force) flacher (flat) und strukturierter (structured) Proben auf hydrophilen (hydrophilic) und hydrophoben (hydrophobic) Substraten in Luft (in air) und deionisiertem Wasser (underwater).

VARENBERG, M. and GORB, S.N. (2008) A beetle-inspired solution for underwater adhesion. *J. R. Soc. Interface* 5 (20): 383-385.

Performance von bio-inspiriertem Haftband: Reibung

Für die Charakterisierung des Effektes der Scherung auf die Funktion faseriger adhäsiver Mikrostrukturen, wurden reibungs- und scherabhängige Änderungen der Ablösekraft von biomimetischen Polyvinylsiloxan- pilzförmigen adhäsiven Mikrostrukturen geprüft. Im Gegensatz zu einer kontrollierten flachen Oberfläche mit deutlicher stick-slip Bewegung und hoher Reibung zeigt die faserige Mikrostruktur eine stabile weiche Gleitung mit ca. vierfach geringerem Reibungskoeffizienten (Abbildung 49). Der strukturierte Kontakt ruft keine Ablösekraft im Scherstatus hervor, während die flache Oberfläche eine weit gestreute und unzuverlässige Ablösekraft beim Kontaktscheren aufweist.

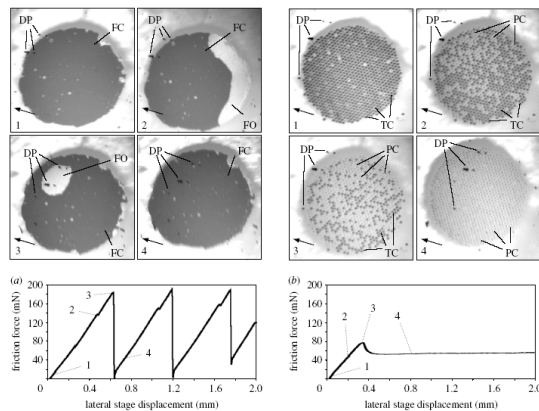


Abb. 49: Reibungskraft (friction force) einer (a) flachen und (b) strukturierten Probe, gemessen als eine Funktion der Auslenkung der lateralen Plattform (lateral stage displacement) unter einer Belastung von 40 mN. a1, a2, a3, a4 = flache Kontaktfläche nach lateralen Auslenkungen von 60, 460, 620 und 720 mm. b1, b2, b3, b4 = strukturierten Kontaktfläche nach lateralen Auslenkungen von 60, 200, 350 und 820 mm. DP, Staubpartikel; FC, flache Oberfläche in Kontakt; FO, flache Oberfläche nicht in Kontakt; TC (dunkel-graue Punkte), terminale Platten in Kontakt; PC (graue Punkte), gekrümmte Säulchen in Kontakt; Pfeile weisen die Richtung, in welche die Probe bewegt wurde. VARENBURG M. and S. GORB (2007) Shearing of fibrillar adhesive microstructure: friction and shear-related changes in pull-off force. J. R. Soc. Interface 4, 721–725.

Es scheint, dass die faserige Mikrostruktur in Anwendungen genutzt werden kann, in denen die totale Haftkraft durch einen binären an/aus- Status generiert und wo Elastomer-Reibung stabilisiert und minimiert werden soll. (VAREMBERG M. and S. GORB 2007 Shearing of fibrillar adhesive microstructure: friction and shear-related changes in pull-off force. J. R. Soc. Interface 4, 721–725).

Hexagonale Oberflächenmikrostrukturen für trockene und feuchte Reibung

Fußmaterialien aus polymeren Schaumstoffen nach dem Vorbild glatter biologischer Haftsysteeme haben sich im Projektverlauf als besonders geeignet herausgestellt. Eine Kombination von Oberflächenstrukturen und innerer poröser/faseriger Materialstruktur kann für die gesuchte Funktion als Greiferbelag des Roboters von großem Interesse sein.

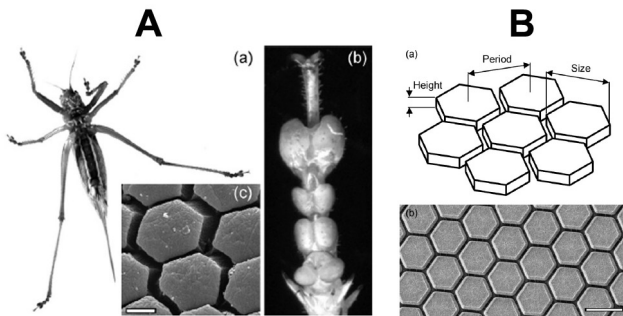


Abb. 50: Tarsale Haftkissen (Euplantulae) des grünen Heupferdes *Tettigonia viridissima* L. Orthoptera, Tettigoniidae; a) vertikale Position auf einer Glasoberfläche; b) Tarsus des Hinterbeines mit vier Euplantulae; c) Detail der Euplantulaeoberfläche (SEM). B. Bioinspirierte mikrostrukturierte Polymeroberfläche. a) Schema der hexagonalen Kontaktplatten mit gleicher Größe (size) und Intervallen (period) von 10, 20, 50 und 95 mm; mit gleicher Höhe (height) von 1 mm. b) Detail der mikrostrukturierten Oberfläche, Maßbalken 10 mm (SEM). VAREMBERG, M. and GORB, S.N. (2009) Hexagonal surface micropattern for dry and wet friction. Adv. Mater., 21: 483-486.

Haftsysteeme von beispielsweise Heupferden oder Fröschen erscheinen zwar makroskopisch glatt, weisen jedoch hexagonale Mikrostrukturen auf (Abbildung 50 A). Deren Funktion wurde in der Reibungsbeeinflussung vermutet, durch die Vermeidung von Aquaplaning und die Optimierung der Dicke des haftvermittelnden Sekretes. Da

sich die Untersuchung dieser Effekte an lebenden Organismen als sehr schwierig gestaltet, wurde auf Polymerproben zurückgegriffen, um experimentelle Studien durchzuführen (Abbildung 50 B). Die Oberflächenstrukturierung mit definierten hexagonalen Mustern erfolgte unter Verwendung von Stahlmasken der Fa. OVD Kinegram (Zug, Schweiz).

Mit dem spezialgefertigten Mikrotribometer mit Selbstausrichtungssystem wurden Reibungstests in Kontakt mit (1) Glas und (2) Mineralöl (Mobil DTE Medium, Viskosität $43,3 \text{ mm}^2\text{s}^{-1}$ bei 40°C) durchgeführt (Abbildung 51).

Die Ergebnisse lassen darauf schließen, dass Haftkissen mit mikrostrukturierten Oberflächen fähig sind, sicheren Kontakt mit feuchten und nassen Substraten zu bilden und zu halten. Flüssigkeiten fließen über die Mikrostrukturen aus der Reibfläche ab. Die hexagonale Form der Strukturen gewährleistet die größtmögliche Kontaktfläche, maximale Stabilität und Isotropie, die größte Länge von Abflussrinnen zwischen den Hexagonen und die effektivste Stabilisierung der Elastomerreibung auf trockenen und nassen Substraten.

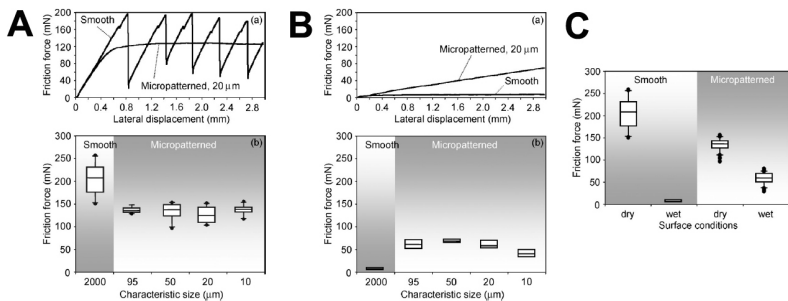


Abb. 51: Reibung auf glatten und mikrostrukturierten Oberflächen (Hexagonintervalle: 10, 20, 50, 95). A. Trockene Reibung. B. Feuchte Reibung. C. Vergleich zwischen trockener und feuchter Reibung mit gemittelten Daten. Jeweils a) charakteristische Reibungskurven als Funktion lateraler Verschiebung und b) komplette Datensätze der maximalen Kraftwerte. VARENBERG, M. and GORB, S.N. (2009) Hexagonal surface micropattern for dry and wet friction. *Adv. Mater.*, 21: 483-486.

Materialscreening: Erprobung Fußmaterial, Materialanalyse

Im Zuge der Auswahl geeigneter Haftmaterialien für die Füße des Kletterroboters wurden Reibungstests (Experimentaldesign vgl. Abbildung 51) mit 16 unterschiedlichen Kunststoffproben (40 x 35 mm) auf zehn verschiedenen Substraten ohne und mit Normalkraft (92 g) durchgeführt, wo drei Substrate (Abbildung 52A-C) und neun Proben von der TETRA GmbH sowie ein Substrat und sieben Proben aus der Oberflächendatenbank der Evolutionary Biomaterials Group (MPI Stuttgart) zur Verfügung gestellt wurden.

Darüber hinaus wurden Replikationen von Haihaut in Epoxidharz (a. starres Einzelstück, b. kleine bewegliche Teilstücke auf Schaumstoff) im Hinblick auf deren potenzielle Verwendung als anisotroper, reibungsaktiver Belag im ventralen Bereich des Roboters in die Tests einbezogen. Die konkreten ermittelten Reibungskoeffizienten und die in einem weiteren Experiment semiquantitativ bestimmte Materialsteifigkeit und die Adhäsionswerte finden sich in den Tabelle 3.

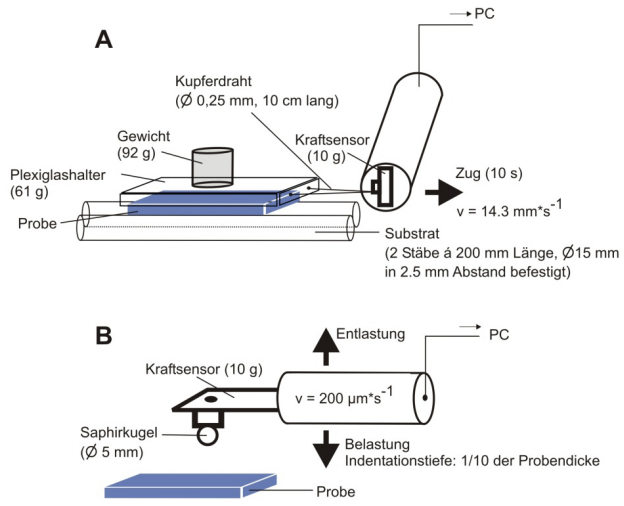


Abb. 52: Experimentaldesign der durchgeführten Tests mit potenziellen Haftmaterialien für RatNic. A. Reibungstest, B. Steifigkeitsmessungen ($23,5 \pm 1,14 \text{ }^\circ\text{C}$, $46,8 \pm 3,71 \text{ \%}$). Voigt, D., Karguth, A., and Gorb, S. N. (2012) Shoe soles for the gripping robot: Searching for polymer-based materials maximising friction. Robot. Auton. Syst. 60: 1046-1055.

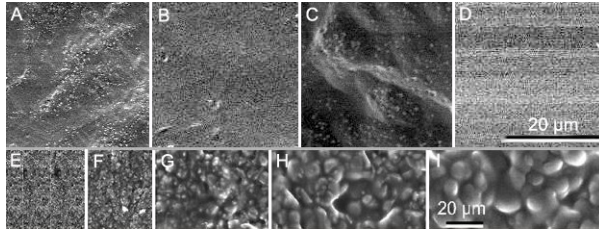


Abb. 53: Rasterelektronenmikroskopische Aufnahmen der Oberflächen der Substrate im Reibungstest. A. Kunststoffrohr. B. Kabel isoliert. C. Metall. D. Glas. E.-I. Schleifpapiere; E. 0,3 µm; F. 1,0 µm; G. 3,0 µm; H. 9,0 µm; I. 12,0 µm. Maßbalken oben für A-D; unten für E-I. Voigt, D., Karguth, A., and Gorb, S. N. (2012) Shoe soles for the gripping robot: Searching for polymer-based materials maximising friction. Robot. Auton. Syst. 60: 1046-1055.

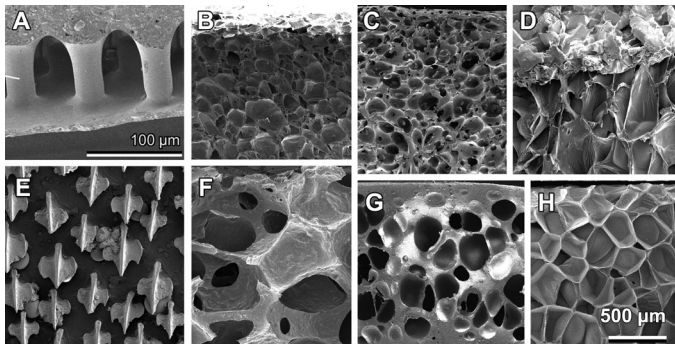


Abb. 54: Rasterelektronen-mikroskopische Aufnahmen einer Auswahl getesteter Proben von potenziellen Haftmaterialien für RatNic im Querschnitt (außer E). A. Sandwichhaftband. B. Dicker Schaumstoff. C. Fußballhandschuhschaumstoff. D. Feines Schleifpapier auf Schaumstoff. E. Haihaut-Replika in Epoxidharz, Draufsicht. F. Gummi-Dichtungsband. G. Schaumgummi-Dichtungsband. H. Dünner Schaumstoff. Maßbalken unten rechts für B-H. VOIGT, D., KARGUTH, A., and GORB, S. N. (2012) Shoe soles for the gripping robot: Searching for polymer-based materials maximising friction. Robot. Auton. Syst. 60: 1046-1055.

Unsere Reibungsexperimente haben deutlich demonstriert, dass jeweils ein glattes und ein strukturiertes Haftband kombiniert mit Schaumstoff als Trägersubstanz die besten Reibungskoeffizienten aufweisen. Das Prinzip des Haftfilms auf einem weichen Substrat wurde durch biologische Haftsysteime inspiriert. Wir schlagen solche Materialien als sehr gute Kandidaten für die Implementierung in robotischen Greifsystemen vor.

Tab. 3: Ermittelte (Gleit-)Reibungskoeffizienten (μ) von 18 potenziellen Haftmaterialien für RatNic (Mittelwert \pm Standardabweichung, $n = 3$). oG: ohne Gewicht; mG: mit Gewicht; SP: Schleifpapier) (Seiten 83/84).

Voigt, D., Karguth, A., and Gorb, S. N. (2012) Shoe soles for the gripping robot: Searching for polymer-based materials maximising friction. Robot. Auton. Syst. 60: 1046-1055.

Probe		Substrat																								
Nr.	Bezeichnung	A		B		C		D		E		F		G		H		I		J						
		oG	mG	Kabel isoliert	oG	mG	Metallrohr	Glasrohr	oG	mG	SP 0.3 µm	oG	mG	SP 1.0 µm	oG	mG	SP 3.0 µm	oG	mG	SP 9.0 µm	oG	mG	SP 12.0 µm	oG	mG	SP 220
1	Schaumstoff dünn	0.5	0.5	0.8	0.8	0.3	0.3	0.8	0.9	0.5	0.5	0.3	0.5	0.4	0.6	0.7	0.6	0.7	0.6	0.7	0.6	1.9	1.7			
		+ 0.29	- 0.02	+ 0.13	+ 0.06	+ 0.04	+ 0.04	+ 0.04	+ 0.09	+ 0.12	+ 0.06	+ 0.08	+ 0.08	+ 0.15	+ 0.03	+ 0.26	+ 0.03	+ 0.26	+ 0.03	+ 0.26	+ 0.03	+ 0.10	+ 0.01			
2	Schaumstoff dick	0.8	0.6	1.1	0.8	0.4	0.6	0.7	0.6	0.8	0.6	0.8	0.6	0.8	0.6	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	1.7	1.4				
		+ 0.23	+ 0.07	+ 0.04	+ 0.12	+ 0.02	+ 0.05	+ 0.19	+ 0.08	+ 0.06	+ 0.00	+ 0.04	+ 0.07	+ 0.02	+ 0.1	+ 0.02	+ 0.01	+ 0.02	+ 0.01	+ 0.02	+ 0.01	+ 0.02	+ 0.07			
3	Fußballhand- schuhschaumstoff	1.2	1.4	2.1	1.9	0.9	1.0	1.5	1.5	1.3	1.3	1.7	1.5	1.3	1.3	1.3	1.4	1.4	1.4	1.4	2.2	1.9				
		+ 0.12	+ 0.12	+ 0.14	+ 0.17	+ 0.08	+ 0.07	+ 0.10	+ 0.20	+ 0.05	+ 0.02	+ 0.15	+ 0.07	+ 0.16	+ 0.10	+ 0.18	+ 0.03	+ 0.18	+ 0.03	+ 0.18	+ 0.03	+ 0.07	+ 0.09			
4	Kunstleder	0.9	0.8	1.4	1.3	0.5	0.5	0.8	0.8	0.7	0.7	0.6	0.7	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	1.1	1.1				
		+ 0.04	+ 0.05	+ 0.18	+ 0.04	+ 0.10	+ 0.07	+ 0.05	+ 0.03	+ 0.08	+ 0.10	+ 0.10	+ 0.07	+ 0.08	+ 0.06	+ 0.03	+ 0.09	+ 0.03	+ 0.09	+ 0.03	+ 0.09	+ 0.11	+ 0.03			
5	grobes Schleifpapier auf Schaumstoff	0.6	0.4	0.7	0.8	0.3	0.3	0.2	0.2	0.4	0.3	0.6	0.5	0.5	0.5	0.6	0.5	0.6	0.5	0.6	0.5	0.9	1.0			
		+ 0.01	+ 0.06	+ 0.10	+ 0.09	+ 0.12	+ 0.03	+ 0.06	+ 0.04	+ 0.13	+ 0.15	+ 0.06	+ 0.06	+ 0.06	+ 0.08	+ 0.08	+ 0.06	+ 0.08	+ 0.06	+ 0.08	+ 0.06	+ 0.07	+ 0.03			
6	feines Schleifpapier auf Schaumstoff	0.5	0.5	0.8	0.9	0.4	0.3	0.2	0.2	0.4	0.4	0.5	0.6	0.6	0.5	0.6	0.5	0.6	0.5	0.6	0.5	0.9	0.9			
		+ 0.15	+ 0.03	+ 0.16	+ 0.10	+ 0.09	+ 0.05	+ 0.08	+ 0.04	+ 0.26	+ 0.06	+ 0.21	+ 0.06	+ 0.12	+ 0.05	+ 0.09	+ 0.08	+ 0.09	+ 0.08	+ 0.09	+ 0.08	+ 0.15	+ 0.02			
7	Dichtungsband Gummi	0.6	0.7	0.9	0.8	0.4	0.4	0.6	0.7	0.7	0.7	0.7	0.7	0.7	0.7	0.7	0.7	0.7	0.7	0.7	0.6	1.4	1.3			
		+ 0.17	+ 0.03	+ 0.09	+ 0.03	+ 0.20	+ 0.07	+ 0.03	+ 0.11	+ 0.10	+ 0.08	+ 0.07	+ 0.07	+ 0.03	+ 0.08	+ 0.07	+ 0.08	+ 0.07	+ 0.08	+ 0.07	+ 0.08	+ 0.05	+ 0.05			
8	Dichtungsband Schaumgummi	0.8	1.1	1.1	1.1	0.6	0.9	1.0	1.1	1.1	1.2	0.8	1.3	0.9	1.0	0.9	1.0	0.9	1.0	1.2	1.0					
		+ 0.31	+ 0.03	+ 0.05	+ 0.09	+ 0.07	+ 0.02	+ 0.16	+ 0.02	+ 0.05	+ 0.12	+ 0.16	+ 0.12	+ 0.26	+ 0.07	+ 0.07	+ 0.07	+ 0.07	+ 0.07	+ 0.07	+ 0.09	+ 0.04				
9	Metall	0.9	0.6	1.0	0.7	0.6	0.5	1.0	0.9	0.4	0.5	0.6	0.6	0.8	0.6	0.9	0.7	0.9	0.7	0.8	0.8					
		+ 0.13	+ 0.09	+ 0.12	+ 0.05	+ 0.05	+ 0.10	+ 0.55	+ 0.08	+ 0.07	+ 0.08	+ 0.07	+ 0.11	+ 0.25	+ 0.02	+ 0.06	+ 0.08	+ 0.06	+ 0.08	+ 0.08	+ 0.28	+ 0.07				
10	glattes Haftband auf dünnem Schaumstoff	2.2	1.8	2.5	2.4	2.8	2.5	2.8	2.7	2.8	2.6	3.2	2.4	2.2	1.6	1.6	1.4	1.6	1.4	1.6	1.4	0.6	0.6			
		+ 0.02	+ 0.05	+ 0.07	+ 0.12	+ 0.12	+ 0.10	+ 0.20	+ 0.16	+ 0.12	+ 0.12	+ 0.12	+ 0.07	+ 0.09	+ 0.03	+ 0.15	+ 0.07	+ 0.15	+ 0.07	+ 0.15	+ 0.07	+ 0.01	+ 0.04			

noch Tabelle 3:

Probe		Substrat																							
Nr.	Bezeichnung	A		B		C		D		E		F		G		H		I		J					
		Kunststoffrohr	Kabel isoliert	Metallrohr	Glasrohr	SP 0.3 µm	SP 1.0 µm	SP 3.0 µm	SP 9.0 µm	SP 12.0 µm															
		oG	mG	oG	mG	oG	mG	oG	mG	oG	mG	oG	mG	oG	mG	oG	mG	oG	mG	oG	mG				
11	strukturiertes Haftband auf dünnem Schaumstoff	1.5	1.4	1.7	1.4	2.1	1.3	2.1	1.5	2.1	1.5	1.7	1.4	1.5	1.2	1.3	1.2	1.3	1.2	1.8	1.4				
		±0.22	±0.07	±0.19	±0.06	±0.15	±0.02	±0.02	±0.06	±0.17	±0.07	±0.11	±0.1	±0.08	±0.09	±0.13	±0.06	±0.13	±0.06	±0.07	±0.12				
		1.1	1.2	0.9	0.9	0.5	0.6	1.8	1.6	0.8	0.9	0.8	1.0	1.1	1.5	1.2	1.2	1.2	1.6	1.3					
12	Greptile	±0.21	±0.07	±0.02	±0.12	±0.09	±0.01	±0.12	±0.04	±0.20	±0.01	±0.6	±0.03	±0.13	±0.02	±0.07	±0.05	±0.07	±0.05	±0.04	±0.06				
		1.5	1.4	1.8	1.4	1.5	1.4	1.9	1.5	1.9	1.5	1.7	1.4	1.7	1.5	1.3	1.5	1.3	1.5	1.2					
13	Polyurethane „hart“	±0.33	±0.73	±0.19	±0.04	±0.12	±0.09	±0.08	±0.02	±0.11	±0.04	±0.18	±0.06	±0.04	±0.08	±0.15	±0.05	±0.15	±0.05	±0.04	±0.10				
		1.6	1.4	1.7	1.5	1.6	1.4	1.8	1.5	1.5	1.4	1.6	1.4	1.7	1.4	1.6	1.4	1.6	1.4	1.6					
14	Polyurethane „weich“	±0.04	±0.07	±0.07	±0.02	±0.03	±0.08	±0.04	±0.04	±0.24	±0.04	±0.07	±0.01	±0.07	±0.06	±0.14	±0.05	±0.14	±0.05	±0.02	±0.04				
		1.5	1.6	1.5	1.5	1.6	1.4	2.3	1.9	1.6	1.4	1.6	1.4	1.6	1.4	1.5	1.5	1.5	1.5	1.7					
15	Anstrich-Material	±0.47	±0.09	±0.13	±0.09	±0.18	±0.06	±0.09	±0.10	±0.10	±0.06	±0.11	±0.06	±0.12	±0.07	±0.19	±0.05	±0.19	±0.05	±0.11	±0.05				
		1.8	1.7	2.3	2.1	2.2	2.0	2.7	2.8	2.4	2.5	2.4	2.3	1.6	1.4	0.9	0.9	0.9	1.1	0.5					
16	Sandwich-Haftband auf dü. Schaumstoff	±0.26	±0.03	±0.16	±0.05	±0.04	±0.06	±0.02	±0.03	±0.02	±0.06	±0.11	±0.08	±0.09	±0.10	±0.06	±0.14	±0.02	±0.06	±0.01	±0.08				
		0.2	0.2	0.4	0.5	0.3	0.2	0.2	0.2	0.5	0.5	0.4	0.6	0.5	0.4	0.7	0.5	0.4	0.5	0.6	0.8				
17	Repлика Haihaut starr, cranial gezogen	±0.01	±0.02	±0.06	±0.04	±0.04	±0.01	±0.06	±0.03	±0.09	±0.06	±0.14	±0.05	±0.10	±0.13	±0.02	±0.05	±0.13	±0.37	±0.14	±0.11				
		0.3	0.2	0.4	0.6	0.3	0.2	0.2	0.1	0.5	0.5	0.6	0.6	0.4	0.4	0.4	0.5	0.4	0.5	0.9	0.9				
18	Repлика Haihaut starr, caudal gezogen	±0.04	±0.02	±0.08	±0.06	±0.03	±0.06	±0.06	±0.04	±0.03	±0.04	±0.07	±0.05	±0.04	±0.03	±0.14	±0.02	±0.06	±0.06	±0.07	±0.02				
		0.3	0.2	0.5	0.5	0.3	0.3	0.2	0.2	0.5	0.4	0.5	0.6	0.6	0.6	0.5	0.4	0.5	0.5	0.7	0.7				
19	Repлика Haihaut „beweglich“ cranial	±0.20	±0.01	±0.06	±0.07	±0.15	±0.00	±0.05	±0.03	±0.04	±0.04	±0.05	±0.05	±0.04	±0.04	±0.08	±0.03	±0.06	±0.04	±0.02	±0.01				
		0.3	0.2	0.5	0.6	0.4	0.3	0.2	0.1	0.5	0.5	0.6	0.6	0.6	0.6	0.4	0.5	0.6	0.6	0.8	0.7				
20	Repлика Haihaut „beweglich“ caudal	±0.11	±0.03	±0.03	±0.07	±0.08	±0.01	±0.03	±0.01	±0.11	±0.10	±0.06	±0.06	±0.05	±0.05	±0.06	±0.00	±0.02	±0.02	±0.10	±0.04				

Tab. 4: Stick/Slip-Effekte im Reibkraftexperiment mit 16 potentiellen Haftmaterialien für RatNic (gemittelte Minima und Maxima, n = 3). oG: ohne Gewicht; mG: mit Gewicht; SP: Schleifpapier (Seite 85/86).

VOIGT, D., KARGUTH, A., and GORB, S. N. (2012) Shoe soles for the gripping robot: Searching for polymer-based materials maximising friction. Robot. Auton. Syst. 60: 1046-1055.

Probe		Substrat																				
Nr.	Bezeichnung	A		B		C		D		E		F		G		H		I		J		
		Kunststoffrohr oG	Kunststoffrohr mG	Kabel isoliert oG	Kabel isoliert mG	Metallrohr oG	Metallrohr mG	Glasrohr oG	Glasrohr mG	SP 0.3 µm oG	SP 0.3 µm mG	SP 1.0 µm oG	SP 1.0 µm mG	SP 3.0 µm oG	SP 3.0 µm mG	SP 9.0 µm oG	SP 9.0 µm mG	SP 12.0 µm oG	SP 12.0 µm mG	SP P 220 oG	SP P 220 mG	
1	Schaumstoff dünn	0.31 0.65	0.17 0.43	0.32 1.00	0.89 0.71	0.15 0.47	0.26 0.71			0.06 0.19	0.38 0.66	0.22 0.48	0.08 0.44	0.32 0.71	0.23 0.62	0.30 0.72	0.49 0.87	0.38 0.80	0.45 0.86	0.30 0.72		0.12 0.27
2	Schaumstoff dick																					
3	Fußballhandschuh- schaumstoff																					
4	Kunstleder	0.75 0.99	0.51 0.97			0.44 0.64	0.38 0.64			0.32 1.03	0.39 0.98	0.27 0.97	0.38 0.90	0.50 0.62	0.71 0.82		0.53 0.57		0.80 0.90			
5	grobes Schleifpapier auf Schaumstoff		0.34 0.42			0.29 0.38	0.24 0.33	0.18 0.24	0.09 0.11	0.42 0.46	0.20 0.23	0.52 0.60	0.43 0.55	0.43 0.50	0.48 0.57	0.46 0.63	0.41 0.55	0.20 0.28	0.45 0.58	0.33 0.81		
6	feines Schleifpapier auf Schaumstoff	0.44 0.61	0.45 0.52			0.31 0.42	0.29 0.37	0.18 0.21	0.19 0.23	0.40 0.45	0.42 0.46	0.50 0.56	0.46 0.61	0.54 0.66	0.51 0.66	0.56 0.70	0.46 0.56	0.43 0.59	0.45 1.22	0.58 1.02	0.67	
7	Dichtungsband Gummi					0.30 0.41				0.61 0.69												
8	Dichtungsband Schaumgummi																					
9	Metall					0.23 1.05	0.38 0.59			0.40 0.58	0.42 0.50	0.49 0.77	0.47 0.66	0.14 0.22			0.66 1.06	0.19 0.24				
10	glattes Haftband auf dünnem Schaumstoff			1.74 2.90	1.77 2.62			1.72 3.35	2.32 2.99	1.77 3.41	2.00 2.47	2.97 3.29										

noch Tabelle 4:

Probe		Substrat															
		A		B		C		D		E		F		G		H	
		Kunststoffrohr oG	mG	Kabel isoliert oG	mG	Metallrohr oG	mG	Glasrohr oG	mG	SP 0,3 µm oG	mG	SP 1,0 µm oG	mG	SP 3,0 µm oG	mG	SP 9,0 µm oG	mG
Nr.	Bezeichnung																
11	strukturiertes Haftband auf dünnem Schaumstoff																
12	Greptile					0,33	0,52			0,73	0,27	0,77					
						0,66	0,72			0,86	0,30	0,84					
13	Polyurethane „hart“	0,94	1,36	1,04	1,36	1,02	1,33	1,51	1,40	1,28	1,42	1,27	1,32	0,67	1,40	1,35	0,84
		1,19	1,51	1,41	1,48	1,78	1,51	2,17	1,61	2,15	1,64	1,88	1,52	1,32	1,55	1,68	0,85
14	Polyurethane „weich“													1,60	1,64		
15	Antirutsch-Material																
16	Sandwich-Haftband auf dü. Schaumstoff	0,00		0,00	0,00			0,00		0,00	0,00						
		1,09		1,50	1,66			2,42		2,14	2,20	2,31					
17	Replika Haihaut starr, cranial gezogen	0,00	0,00			0,00	0,00			0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
		0,13	0,16			0,22	0,18			0,38	0,40	0,42	0,56	0,42	0,33	0,59	0,48
18	Replika Haihaut starr, caudal gezogen	0,23	0,16			0,22	0,17	0,13	0,13	0,00	0,00			0,00	0,00	0,00	0,00
														0,33	0,32	0,50	0,72
19	Replika Haihaut „beweglich“ cranial	0,00	0,00			0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00			0,00	0,00	0,00	0,00
		0,20	0,20			0,30	0,22	0,22	0,04	0,39	0,34			0,60	0,58	0,35	0,40
20	Replika Haihaut „beweglich“ caudal	0,00	0,00			0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00			0,00	0,00	0,00	0,00
		0,27	0,13			0,32	0,11	0,21	0,36	0,36	0,58			0,53	0,43	0,30	0,48
																	0,49
																	0,55

Tab. 5: Adhäsion von 16 potenziellen Haftmaterialien für RatNic, ermittelt im Steifigkeitsexperiment (Mittelwerte, n = 3).

Voigt, D., Karguth, A., and Gorb, S. N. (2012) Shoe soles for the gripping robot: Searching for polymer-based materials maximising friction. Robot. Auton. Syst. 60: 1046-1055.

Probe		Adhäsion [mN]	Preload [mN]
Nr.	Bezeichnung		
1	Schaumstoff dünn	0,2	28,2
2	Schaumstoff dick		
3	Fußballhandschuhschaumstoff	0,2	39,0
4	Kunstleder	0,4	31,3
5	grobes Schleifpapier auf Schaumstoff	0,4	54,3
6	feines Schleifpapier auf Schaumstoff	0,2	34,2
7	Dichtungsband Gummi	0,3	29,8
8	Dichtungsband Schaumgummi	0,2	35,0
9	Metall	0,3	35,3
10	glattes Haftband glatt auf dünnem Schaumstoff	0,7	31,8
11	strukturiertes Haftband glatt auf dünnem Schaumstoff	0,7	34,5
12	Greptile	0,3	29,8
13	Polyurethane „hart“	4,9	34,0
14	Polyurethane „weich“	19,8	33,3
15	Antirutsch-Material	2,2	33,2
16	Sandwich-Haftband (strukturiert/glatt) auf dünnem Schaumstoff	0,5	38,4
17	Replika Haihaut starres Einzelstück	0,6	32,1
18	Replika Haihaut bewegliches Einzelstück auf dünnem Schaumstoff	0,4	32,2

Tab. 6: Steifigkeit von 16 potenziellen Haftmaterialien für RatNic (Mittelwerte, $n = 3$)
 Voigt, D., Karguth, A., and Gorb, S. N. (2012) Shoe soles for the gripping robot: Searching for polymer-based materials maximising friction. Robot. Auton. Syst. 60: 1046-1055.

Probe		Steifigkeit [N/m]
Nr.	Bezeichnung	
1	Schaumstoff dünn	93,6
2	Schaumstoff dick	89,8
3	Fußballhandschuhschaumstoff	61,0
4	Kunstleder	126,8
5	grobes Schleifpapier auf Schaumstoff	130,7
6	feines Schleifpapier auf Schaumstoff	128,7
7	Dichtungsband Gummi	53,3
8	Dichtungsband Schaumgummi	111,5
9	Metall	140,4
10	glattes Haftband glatt auf dünnem Schaumstoff	76,2
11	strukturiertes Haftband glatt auf dünnem Schaumstoff	98,2
12	Greptile	95,6
13	Polyurethane „hart“	61,3
14	Polyurethane „weich“	61,1
15	Antirutsch-Material	90,9
16	Sandwich-Haftband (strukturiert/glatt) auf dünnem Schaumstoff	102,4
17	Replika Haihaut starres Einzelstück	144,2
18	Replika Haihaut bewegliches Einzelstück auf dünnem Schaumstoff	130,0

2.1.6 Katalog für adhäsive Kontaktmechanismen

Unter Berücksichtigung der biologischen Vorbilder und gesammelten Erkenntnisse schlagen wir folgenden Katalog (Morphologischen Kasten) als Entscheidungshilfe beim Roboterdesign vor: Kontaktmechanismen, entsprechende Kinematik/Bewegungsabläufe und Unterbauten können für Roboterfüße zur Fortbewegung auf verschiedenen Substraten in horizontaler und vertikaler Richtung sowie über Kopf ausgewählt werden (Abbildung 55).

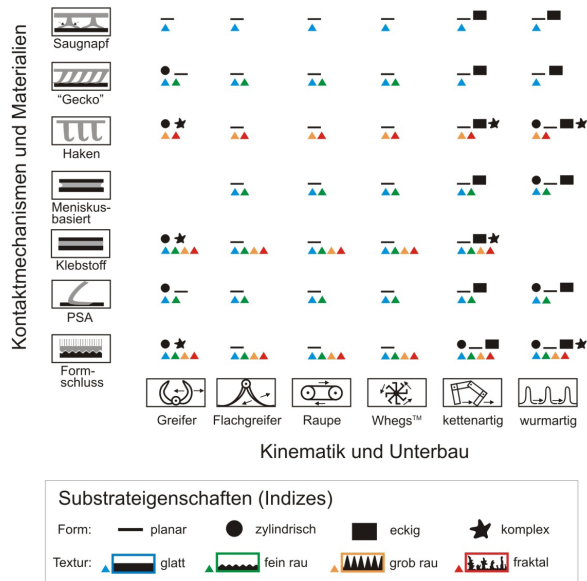


Abb. 55: Katalog für die Auswahl von Kontaktmechanismen/Materialien in Kombination mit entsprechender Kinematik und Unterbau für Roboterfüße zur terrestrischen Fortbewegung auf Substraten mit unterschiedlichen Eigenschaften. Erläuterungen: „Gecko“, trockene Adhäsion mittels Haftstrukturen; Meniskus-basiert, kapillare Effekte durch haftvermittelnde Flüssigkeiten; PSA, pressure sensitive adhesives/Haftbänder/Klebeblätter wie Tesa oder Scotch; Whegs™, Laufräder; komplex, keine definierte Geometrie, sondern bspw. Verästelungen, Hinterschnidungen, Auswölbungen; fein rau, Nano- und Mikrorauheiten; grob rau, Makrorauheiten; fraktal, undefinierte, grobe Oberflächenstrukturen. Künftige Herausforderungen bestehen in der kategorischen Einbindung weiterer Einflussfaktoren wie Substratsteifigkeit, texturbedingte Richtungsabhängigkeiten, Schmiermittel, Substratkontaminationen oder die Medien (Luft, Wasser), in denen die Roboterfüße funktionieren sollen. (Fortsetzung nächste Seite)

VOIGT, D., KARGUTH, A., and GORB, S. N. (2012) Shoe soles for the gripping robot: Searching for polymer-based materials maximising friction. Robot. Auton. Syst. 60: 1046-1055.

Kombinationen verschiedener Paarungen sind möglich. Aufgrund der Komplexität sind die Parameter einzelner Kontaktmechanismen nicht im Katalog berücksichtigt und müssen nach der Auswahl für die bestimmten Kombinationen gesondert betrachtet werden.

2.1.7 Entwicklungsprozess des Kletterroboters „RatNic“

Dem bionisch unterstützten aber dennoch technisch geprägten Entwicklungsprozess muss die technische Biologie vorangehen. Die Bionik wird als Methode zum Systementwurf, als Anleitung für Teilkonstruktionen und als Inspiration für völlig neuartige Lösungsansätze gesehen. Durch die Zusammenfassung des Wissens und der Erfahrungen von Ingenieuren und Biologen können Maschinen mit einer neuen technischen Qualität und großen Nachhaltigkeit gebaut werden.

Bionisch begleiteter Gesamtsystementwurf

TETRA hat mit dem Projekt InspiRat einerseits den Einstieg in eine neue Technologie – die Steuerung elastischer Bewegungssysteme - verfolgt. Andererseits sollten mit der Beherrschung dieser Technologie neuartige Marktsegmente erschlossen werden, die mit konventioneller Robotertechnik nicht besetzt werden können, wie z.B. die Übernahme von Inspektionsaufgaben in für den Menschen nur schwer oder gar nicht zugänglichen Bereichen.

Das Projekt „InspiRat“ hingegen war so angelegt, dass die Technische Biologie dem ingenieurmäßigen Entwicklungsprozess parallel läuft. Im Projekt konnte man doch auf langjährige Erfahrungen und Ergebnisse bezüglich des Kletterns zurückgreifen – ein grundlegendes Verständnis war vorhanden. Für die Konstruktion der Klettermaschine RatNic wurden Grundlagenerkenntnisse von Biologen und erfahrenen Bionikern sowie viel theoretisches und praktisches Wissen aus den bisherigen industriellen Bionik-Projekten genutzt. Konsens bestand darin, dass beim Klettern unter verschiedenen Aspekten elastische Elemente notwendigerweise in den Roboter integriert werden mussten.

Vier Aspekte waren dabei grundlegend:

Gleiche Strukturgrößen in Biologie und Technik - Wenn man eine Maschine bauen will, die eine bestimmte Bewegungsfunktionalität realisieren soll, so sollte man ein Tier als Vorbild auswählen, das eine ähnliche Größendimension wie die Ziel-Maschine besitzt. Die Klettermaschine RatNic hat in ihrer Dimension eine Ratte als Vorbild.

Wirbelsäule als Hauptbewegungsorgan - Auch bei Säugetieren trägt die Wirbelsäule wesentlich zum Bewegungsvorschub bei. Deshalb wurde bei der Konstruktion des Kletterroboters ein hohes Augenmerk auf diese Funktionalität gelegt.

Funktionelle und strukturelle Redundanz, Leichtbaukonstruktion - Das Skelett der Wirbeltiere ist durch eine Vielzahl von Muskeln, Bändern und Sehnen umgeben. Für die technische Konstruktion wurden bestimmte Wirkprinzipien wie z.B. elastisch verkoppelte Gelenke, redundante Seilzüge oder nachgiebige Leichtbaukonstruktionen angewendet.

Minimale Masse und minimaler Energieverbrauch - Entsprechend den technischen Zielvorgaben und nach der Auswertung der biologischen Vorbilder stand die Realisierung eines minimalen Energieverbrauches und damit verbunden eine minimale Systemmasse im Vordergrund. Dies wurde durch folgende Maßnahmen erreicht:

- Reduzierung der Zahl und Leistung der Antriebe auf das absolut notwendige Minimum
- Nach dem Vorbild der Natur Verzicht auf starre Führungen und Spindelgetriebe
- Einsatz von leichten Seilzuggetrieben
- Verwendung spezieller Haftmaterialien für die Greifer zur Realisierung einer großen Rutschkraft bei kleiner Greifkraft
- On-Board-Steuerelektronik mit geringer Verlustleistung
- Symmetrierung der Momentenverläufe durch Gewichtskompensationen mit Federmechanismen
- Ausnutzung von Elastizitäten und der Selbsthemmung beim Greifen (→ Stromreduzierung beim Greifkontakt)
- Abschaltung nicht verwendeter Verbraucher (z.B. Sensoren, Motoren etc.)

Da der Kletterroboter für das Klettern an senkrechten Substraten ausgelegt werden sollte, wurde das Stemmklettern als Vorbild gewählt. Hierbei können die vorderen und hinteren Gliedmaßen zu jeweils einem „Greifer“ zusammengefasst werden (Reduktion der Antriebe). Bei dieser Kletterart bilden Vorderbeine, Wirbelsäule und Hinterbeine einen zusammenfassbaren Hauptantrieb für den Vorschub. Zusätzliche Antriebe sind für das Überwinden von Hindernissen oder das seitliche Greifen erforderlich.

Zur Vermeidung eines Absturzes spielt die Kontrolle des Greifkontaktes während des Kletterns eine wichtige Rolle. Auf den Einsatz von Kraftsensoren wurde bewusst verzichtet (Technischer Aufwand, Masse- und Kabelprobleme). Für die Kontrolle des Greifkontaktes wurden die Signale der ohnehin vorhandenen Hall-Drehgelenksensoren und die Motorströme ausgewertet. Durch die kurzzeitige Erhöhung des Greifmomentes nach der Kontaktidentifikation wurde stets ein sicherer Greifkontakt sichergestellt. Sollte es zum Rutschen am Substrat kommen, ist dieser Zustand durch nochmaliges Greifen zu beheben. Zur Einleitung der Greiffunktion wurde ein Schaltkontakt ausgewertet, welcher das Aufsetzen des Greifers auf dem Substrat definiert.

Zur Minimierung der Greifkraft ist die Optimierung der Kontaktstruktur und des Kontaktmaterials von entscheidender Bedeutung. Für verschiedene Materialpaarungen wurden die Reibverhältnisse getestet und die besten Kontaktmaterialien ausgewählt.

Kinematisches Grundkonzept

Aus den Betrachtungen zur Biologie des Kletterns und den möglichen technischen Lösungen können verschiedene Funktionsprinzipien in Betracht gezogen werden:

- A) Kompakter Rumpf mit vier oder mehr Beinen
- B) Zweigeteilter Rumpf mit je zwei Beinen und einem beweglichen Verbindungselement
- C) Mehrfachgeteilter Rumpf mit je einem Klemm- bzw. Greiforgan

In der Biologie sind die Varianten A und B bzw. entsprechende Kombinationen anzutreffen. Die Variante C ist eine technisch durchaus interessante Lösung, die jedoch für das Klettern an linearen Strukturen Überbestimmtheiten aufweist.

Die technische Umsetzung eines „freien Kletterns“, wie es z.B. von Affen oder Chamäleons ausgeführt wird (Variante A), bedingt eine gezielte Bein- bzw. Armbewegung (Trajektorienplanung). Diese Variante ist mit den momentanen technischen Mitteln nicht realisierbar.

Daher erfolgt eine Konzentration auf die Variante B. Zur Verankerung der Körper am Klettersubstrat kommen bein- oder fingerähnliche Mechanismen zum Einsatz, an deren Ende sich wiederum Greif- oder Klemmmechanismen mit speziellen Haft- und Funktionsstrukturen befinden. Um die Klemmfunktion möglichst einfach zu gestalten, bildet der Körper selbst einen Anlagepunkt am Klettersubstrat.

Das Klettersystem wurde in einen Vorder- und einen Hinterkörper aufgeteilt, welche durch eine bewegliche „Wirbelsäule“ verbunden sind. Für die Relativbewegung zwischen Vorder- und Hinterkörper ist mindestens der Freiheitsgrad $F = 4$ erforderlich (Vorschub, Anheben, Nicken, Schwenken). Beim senkrechten Klettern ist es sinnvoll, die Hauptmasse im Hinterkörper quasi als Pendelmasse zu konzentrieren.

Das Klettern erfolgt in folgenden Schritten:

- 1) Hinterkörper ist am Substrat durch Greifer fixiert
- 2) Vorderkörper wird nach vorn und/oder über ein Hindernis bewegt
- 3) Vorderkörper wird am Substrat durch Greifen fixiert
- 4) Hinterkörper löst Greifkontakt
- 5) Hinterkörper wird dann „nachgezogen“ (Hierbei kann ein Rutschen über mögliche Hindernisse erfolgen.)
- 6) Hinterkörper wird wieder fixiert und Vorderkörper losgelassen

Antriebs- und Übertragungsmechanismen

Nach einer Analyse der Funktionsfähigkeit in Bezug auf die Systemmasse, die Ansteuerung der Antriebe und die Energieversorgung erfolgte die Entscheidung für den Einsatz elektromotorischer Antriebe.

Die Kraft- bzw. Momentenübertragung zu den Wirkelementen erfolgt über sehnensbasierte Übertragungsmechanismen mit integrierten Elastizitäten (siehe Abbildung 56). Die Übersetzungsverhältnisse sind so dimensioniert, dass sich eine selbsthemmende Wirkung ergibt. Mit dieser Funktionalität sind in Verbindung mit der Ansteuerung erhebliche Energiesparpotenziale verbunden.

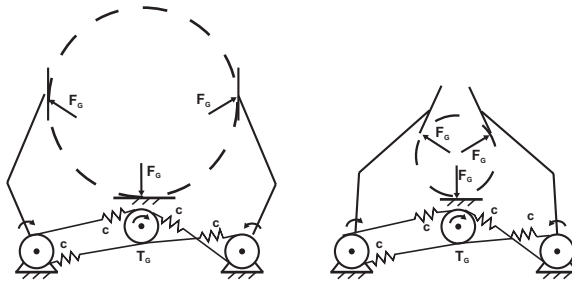


Abb. 56: Kinematisches Grundkonzept des Greifers. Die Übertragung erfolgt über elastische Zugmittel (T_G = Moment _{Greifer}, c = Federsteifigkeit, F_G = Greifkraft).

Der Vorschubmechanismus wurde als Koppelgetriebe mit einer veränderlichen Koppel­länge ausgelegt. Der Vorschub erfolgt durch T1 und der Höhenausgleich durch T2. Die Übertragungscharakteristik der Antriebseinheiten ist selbstsperrend (Energie­sparpotenzial). Das Nicken des Vorderkörpers wird ebenfalls durch ein antagonistisches Seilzuggetriebe über Bowdenzüge realisiert (nicht in Bild dargestellt).

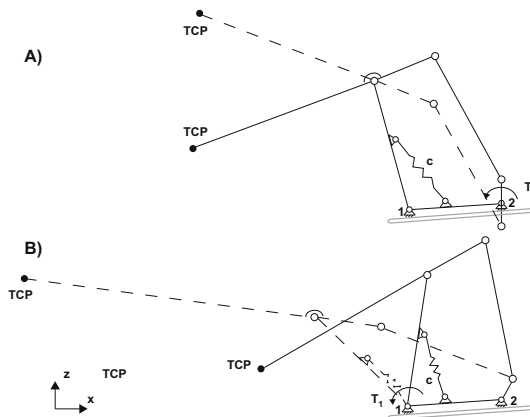


Abb. 57: Das kinematische Grundkonzept für die Fortbewegung in der sagittalen Ebene ist ein Fünf-Gelenk-Mechanismus mit zwei Antrieben. TCP = "Tool Center Point". In diesem Fall ist der TCP gleich dem Verbindungspunkt mit dem Vorderkörper. Beispielhaft A: vertikale Bewegung B: horizontale Bewegung.

Die konstruktive Grundlage für den Schwenkmechanismus bildet ein „elastischer Stab“, der in der Schwenkrichtung elastisch nachgiebig ist und senkrecht zur Schwenkrichtung eine hohe Steifigkeit aufweist. Die Bewegungseinprägung erfolgt über einen antagonistisch verkoppelten Seilzugmechanismus, wobei die Seile partiell durch Bowdenzüge geführt werden. Damit kann der Motor starr im Rumpf des Roboters verbaut werden.

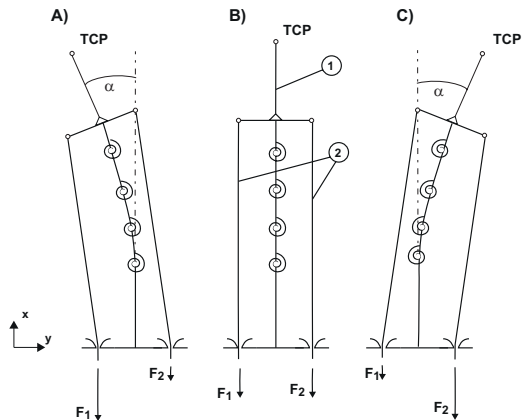


Abb. 58: Bewegungsmechanismus in der transversalen Ebene. TCP = "Tool Center Point", 1 und 2: Seilzüge.

Mechatronische Umsetzung

Der Rumpf hat einen mechanischen, voll aktuierten Freiheitsgrad von $\text{DoF} = 4$, was bedeutet, dass vier elektromechanische Antriebe integriert sind (vgl. Abb. 59). Er teilt sich in einen Vorder- (2) und einen Hinterkörper (6), die über ein Rumpfelement (4) mit lokalen Elastizitäten und einen aktiven Mehrgelenksmechanismus (7) verbunden sind. Die Übertragung der mechanischen Energie wird über Zugmittel (5) bzw. über ein Stirnradgetriebe (nicht abgebildet) realisiert. Zur Energiespeicherung und Entlastung der Antriebe ist eine Feder (8) in den Antriebsstrang integriert. An den Rumpf sind zwei Greifer (1, 10) angebracht, es handelt sich dabei um Fingergreifer. Das Öffnen und Schließen jedes Greifers wird jeweils über einen elektromechanischen Antrieb realisiert (3, 11). Darüber hinaus verfügt der hintere Greifer über eine aktive Verstellmöglichkeit der Länge der Greiferfinger (12).

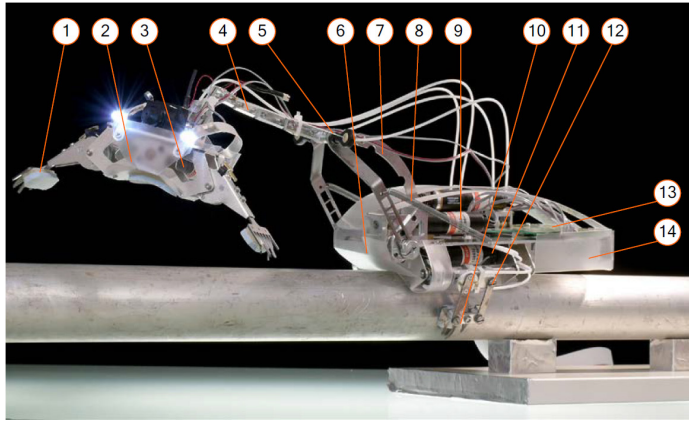


Abb. 59: Aufbau des Kletterroboters RatNic. Der Roboter besteht aus Vorder- (2) und Hinterkörper (6), die durch eine aktive nachgiebige Struktur (4, 7) verbunden sind. Der Vorderkörper agiert als mechanischer Greifer (1) mit Antrieb (3). Der hintere Körper hat ebenfalls eine Funktion als Greifer (10), trägt zusätzlich die Aktorik für den hinteren Greifer (11) und für die Bewegungserzeugung (9). Die Antriebskräfte werden teilweise über Seilzüge (5) übertragen. Elastische Elemente zur Speicherung mechanischer Energie (8), die gesamte Elektronik (13) und eine Energieversorgung (14) sind integriert.

Tab. 7: Funktionelle Parameter des Roboters RatNic

Kenngröße	Wert
Substrate	Ø 1 cm bis 6 cm (Kabel/Rohre/Seile)
Minimaler Ø einer „Röhre“	15 cm
Klettergeschwindigkeit	max. 50 mm/s
Zugkraft	ca. 5 N (je nach Substrat)
Traglast	ca. 0,2 kg (z.B. für Sensoren)
Beweglichkeit	Klettern auf/ab Greifen vorn/hinten Beinschieben hinten Nicken, Gieren des Vorderkörpers

Tab. 8: Technische Parameter des Roboters RatNic:

KenngroÙe	Wert
Systemgewicht (mit Akku und Elektronik)	ca. 1,1 kg (Ursprüngliches Ziel war 1,5 kg bis 2 kg)
Länge	350 mm zusammengezogen, 480 mm gestreckt
Breite	12 cm
Höhe	13 cm eingezogen, 10 cm gestreckt (max. 15 cm)
Antriebe	7 DC-Motoren, elastisch verkoppelte Gelenke (Greifen vorn; Greifen hinten; Hintere Beine schwenken; Hauptvorschub; Vorschubkoppel; Schwenken; Nicken)
Systeminterne Sensoren	8 x Hall-IC (analoge Absolutposition Gelenke) 1 x 3D-Beschleunigungssensor (CMA 3000, VTI) 1 x 3D-Gyrosensor (CMR 3000 VTI)
Umweltsensoren (Optional)	1 x Funkkamera + Mikrophon 1 x Laserpointer 1 x Temperatur/Feuchte-Sensor SHT11 2 x Opto-Entfernungssensoren (Sharp) 1 x IR-Thermosensor 1 x Gassensor
Beleuchtung für Kamerafunktion	2 x LED weiss 1 x Laserpointer
Statussignalisierung	3 x Status-LED 1 x Signaltonger (Buzzer)
Steuerung	Microcontroller Fujitsu MB 96F348; Integrierte Leistungsverstärker für Antriebe (max. 1,5 A)
Kommunikation	- Funk, 868 Mhz - RS 232
Stromversorgung	2 x LiPo-Akku 11,1 V, 1500 mAh Systeminterne Kontrolle der Akkuspannungen

Das Vorbild für die RatNic-Kralle bildete die Funktionalität einer Katzenkralle. Aus den Prinzipanalysen der Biologie wurde ein spezieller, elastischer Koppelmechanismus abgeleitet (siehe Abbildung 60). Eine weitere Besonderheit dieses Funktionsprinzips besteht darin, dass für die Schwenkbewegung des „Eingrabens“ kein zusätzlicher Antrieb benötigt wird (Masse- und Energieeinsparung!)

Konstruktive Ausführung

Für die Realisierung der Kletterfähigkeit von RatNic an Bäumen oder Holzsubstraten wurde ein spezieller Krallenmechanismus entwickelt. Hierbei ist es wichtig, dass sich die Kralle beim Herstellen des Kontaktes in das Substrat „eingräbt“ und beim Lösen des Kontaktes möglichst einfach herausziehen lässt.

Die in der Designstudie gemachten Einhausungsvorschläge konnten nur teilweise berücksichtigt werden. Die Roboterkonstruktion ist so ausgelegt, dass leichte Verschmutzungen keinen Einfluss auf die Funktionalität haben. Der Roboter kann mit Hilfe von Druckluft gereinigt werden.

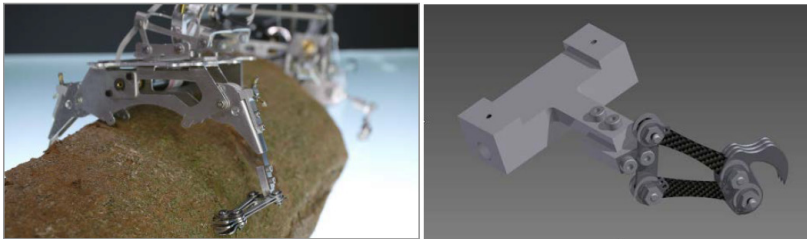


Abb. 60: Krallenmechanismus zum Klettern auf weichen Substraten.

In die Einhausung werden folgende Anforderungen gestellt:

- extrem leichte Konstruktion
- keine Beeinflussung der Beweglichkeit des Robotersystems
- Abfangen von mechanischen Beeinflussungen (Stöße)
- Leicht wechselbar
- Verwendung transparenter und elastischer und energieabsorbierende Materialien

Für die weiteren Entwürfe der Einhausung erfolgte eine Konzentration auf elastische Mikrogewebe sowie auf transparente PC-Folie.

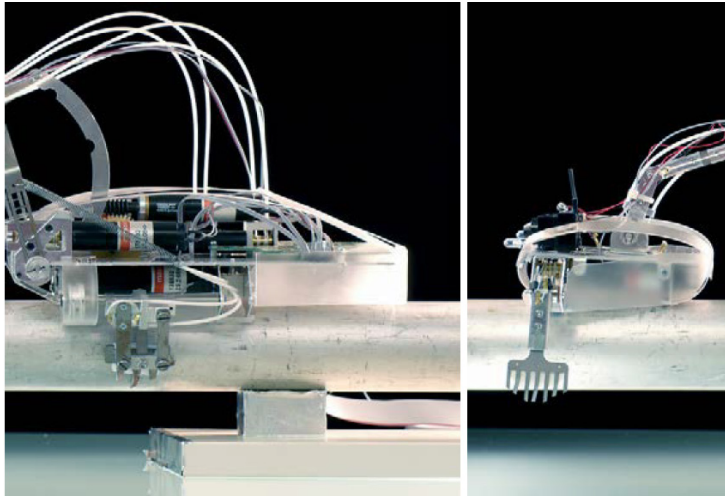


Abb. 61: RatNic-Komponenten mit Einhausung.

Bewegungssteuerung

Eine Analyse der Steuerungssoftware verschiedener vergleichbarer Robotersysteme hat gezeigt, dass eine Standardsoftware am Markt nicht verfügbar war.

Insbesondere für die Steuerung und Regelung wurden verschiedene Strategien einer Bewertung in Hinblick auf den Einsatz im RatNic unterzogen.

Die folgenden Softwarefunktionalitäten wurden realisiert:

- Definition von Bewegungsprimitiven
- Regelung der einzelnen Antriebe auf der Basis eines PID-Reglers
- Adaptiver PID-Regler für den Hauptantrieb
- Energieoptimale Greiffunktion
- Ablaufsteuerung auf der Basis einer „State-Machine“
- Funktionalität der Funkkommunikation

- Softwareplattform zur Systemparametrisierung und Bewegungsvisualisierung
- Steuerungsfunktionen mit Hilfe eines Gamepads
- Grafische Benutzeroberfläche (GUI) mit 3D-Animation
- Neuronale Steuerung für die Funktionalität „Krabbeln“
- Filterfunktionen zur Bearbeitung der Sensorsignale

Der Taktzeit für die Steuerung des Bewegungsablaufes und für die Antriebsregelung beträgt 100 ms. Während des Kletterns wird diese Taktzeit nur ca. 2 % ausgelastet. Das bedeutet, dass die Steuerung über genügend Rechenkapazität auch für die Abarbeitung weiterer Funktionalitäten verfügt.

Für die Entwicklung der On-Board-Steuerung von RatNic standen folgende Forderungen im Vordergrund:

- Realisierung der Zielfunktionalität (incl. Regelalgorithmen)
- Minimaler Bauraum
- Geringes Eigengewicht
- Geringe Verlustleistung
- Möglichkeit der Deaktivierung der Sensoren und Motoren (Energiesparmodus)

Für die Fortbewegung wurden zwei verschiedene Fortbewegungsarten realisiert – eine arboreale Fortbewegung und eine terrestrische Fortbewegung.

Die Kletterfunktionalität wurde über einen parametrisierbaren Satz von Bewegungsprimitiven realisiert. Softwaretechnisch wurde diese Funktionalität als „Statemachine“ in den Roboter implementiert.

Für die Realisierung der Krabbelfunktionalität wurde eine neuronale Steuerung umgesetzt. Über die Parametervariation kann die Geschwindigkeit und die Beinamplitude angepasst werden.

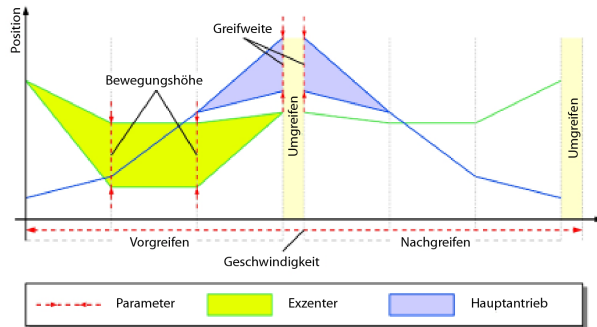
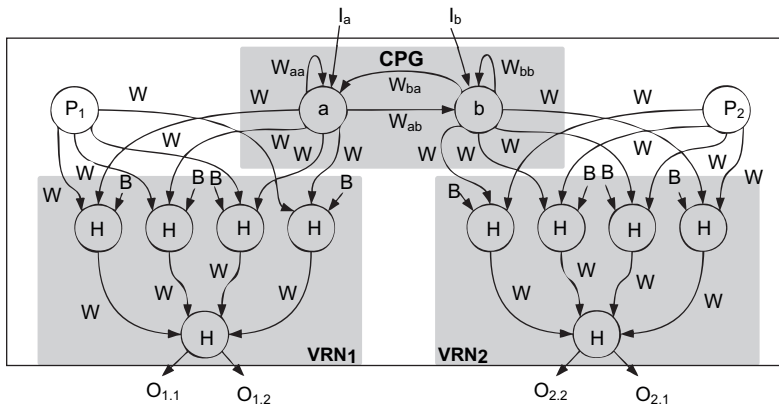


Abb. 62: Konzept der Steuerung als Zustandsmaschine (= "state machine")
(modifiziert nach SCHWEITZER M., 2008).



I = Input (temporary learning parameters) O = Output W = Weights

Abb. 63: Neuronales Netz zur Steuerung der terrestrischen Fortbewegung.
Ein CPG (Central Pattern Generator) treibt zwei VRN (Velocity Regulating Networks) an
(modifiziert nach SCHWEITZER M., 2008).

Klettern auf waagerechten Substraten

Als besonders herausfordernd stellte sich das Klettern auf horizontalen Substraten dar. Die Ergebnisse der Tierexperimente der Zoologen an der FSU Jena zeigen deutlich, dass es signifikante Unterschiede beim Klettern an senkrechten, geneigten und waagerechten Strukturen gibt. Beim Klettern auf waagerechten Strukturen werden die Hände zum Festhalten am Substrat eingesetzt. Die Beine haben neben der Vorschubbewegung die Funktion des Ausbalancierens auf dem Substrat.

Das technische Klettersystem muss so gestaltet werden, dass die Drehachse der Ausgleichsbewegung virtuell in der Mitte des Klettersubstrates gelegt wird. Da der Kletterroboter RatNic keine Beinextremitäten hat, sondern nur zwei Greifstellen am Vorder- und am Hinterkörper, muss durch einen zusätzlichen Mechanismus die relative Drehbewegung zwischen vorder- und Hinterkörper realisiert werden (siehe Abbildung 64). **Zur virtuellen Verlagerung der Drehachse in die Mitte des Klettersubstrates** wird die Bewegung über einen asymmetrischen Koppelmechanismus eingeleitet.

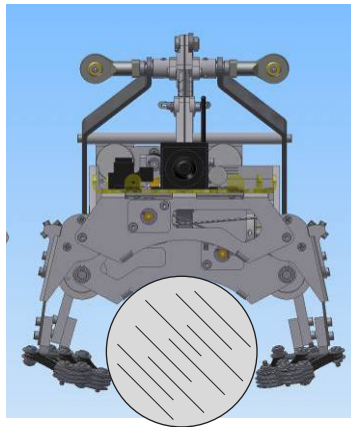


Abb. 64: Technisches Klettern auf horizontalem Substrat unter Nutzung von "Greifhänden".

Weiterhin wurde die Gesamtmasse auf Vorder- und Hinterkörper möglichst gleich aufgeteilt, der Vorteil der „Pendelmasse“ wie beim senkrechten Klettern entfällt. Mit Hilfe eines 2D-Beschleunigungssensors wird die Neigung des Hinterkörpers kontrolliert und durch eine Gegensteuerung wieder ausgeglichen.

Testergebnisse

Die Funktionstests wurden bei TETRA an einer Kletterwand sowie an der TU Ilmenau in einem Kletterlabor durchgeführt.

Im Ergebnis der Tests können die folgenden grundlegenden Aussagen getroffen werden:

- Durch eine sinnfällige Steuerungsfunktionalität (Software) kann unter Ausnutzung mechanischer Eigenschaften (z.B. nachgiebige Mechanismen) der Energiebedarf beim Klettern um ca. 70% reduziert werden.
- Eine Anwendung von bionisch inspirierten Steuerungsstrategien (z.B. neuronale Netze) ist mit der Zielhardware möglich, bringt aber keine signifikanten Vorteile bezüglich des Energiebedarfs.
- Mit den Tests wurde der Nachweis erbracht, dass RatNic in einfachen Bewegungsabschnitten autonome Kletterfähigkeiten besitzt.
- Für die Kletterbewegung konnte eine optimale Klettergeschwindigkeit in Bezug auf den Energiebedarf bei einer gegebenen Masse definiert werden.
- Die Grundlage für die entwickelten Steueralgorithmen bildet das kinematische Modell des Roboters.
- Neben der Kletterfunktionalität konnte auch die Funktionalität eines einfachen Krabbelns in der Ebene realisiert werden.
- Für die manuelle Steuerung des Roboters ist die Verwendung eines „Gamepads“ zweckmäßig.
- Für die Erweiterung der Kletterfunktionalität ist eine konstruktive Überarbeitung insbesondere von ausgewählten Übertragungsmechanismen erforderlich.
- Für das autonome Klettern ist die Integration eines Sensors erforderlich, welcher den Substratkontakt und das möglich Rutschen beim Greifen signalisiert.
- Das Klettersystem hat einen ungeplanten „Absturz“ aus ca. 1,5 m problemlos überstanden.

Durch die Anwendung bionischer Funktionsprinzipien, einer Leichtbautechnologie, neuester elektronischer Bauelemente und energieoptimaler Steuerungsstrategien konnte eine Klettermaschine gebaut werden, die ca. 75% weniger Masse und

Energiebedarf gegenüber konventionellen Roboter-Konstruktionen und ca. 50% geringere Masse und Energiebedarf gegenüber den eigenen Pflichtenheftparametern aufweist.

Die Hauptursachen für diese hervorragenden Einsparungseffekte liegen in:

- der kinematischen Struktur und den Bewegungsmechanismen,
- der Leichtbaukonstruktion,
- den Haftmaterialien und in
- der Elektronik und Stromversorgungstechnik.

Durch die Optimierung der Mechanik und der Software konnte die Kletterfähigkeit und Robustheit wesentlich erhöht werden. Folgende Aussage von Frau Anne Wormit (Redakteurin der „Grossen Show der Naturwunder; Jahr??) war für uns die Bestätigung unserer Arbeit:

„Der Kletterroboter RatNic war in der Geschichte der „Naturwundershow“ der einzige Roboter, der sofort und zuverlässig über die Proben bis zur Live-Aufzeichnung funktionierte“ (mit Bezug auf bereits gezeigte andere Robotersysteme).

2.1.8 Entwicklung eines modularen Kletterrobotersystems CREST

Neben dem Kletterroboter RatNic wurde im Rahmen des Projekts ein modulares Kletterrobotersystem entwickelt. Es handelt sich dabei um ein heterogenes modulares System, welches aus funktionell unterschiedlichen Modulen besteht. Bezeichnet wird das modulare Robotersystem im Folgenden als CREST (Climbing Robot for Rescue and Exploration Tasks).

Das modulare Grundsystem

Das System besteht grundsätzlich aus den Funktionsmodulen für das Greifen (Greifmodule) und das Erzeugen von Bewegung (Bewegungsmodule). Ein weiteres Modul ist das Energieversorgungsmodul. Die Module werden durch unterschiedliche mechanische Koppellemente über die definierte Schnittstelle verbunden. Bei der Entwicklung wurden unter Zusammenfassung „ähnlicher“ Anforderungen eine Anforderungsliste an die Funktionsmodule erarbeitet. Modulintern ist eine Struktur aus einheitlichen, anwendungsparametrisierbaren und anwendungsspezifischen Komponenten realisiert, welche domänenübergreifend umgesetzt ist. Als einheitliche

mechanische Komponente wurde ein Modulrahmen entwickelt, der eine Grundlage für alle Module bildet. Des Weiteren wurde das Konzept einer einheitlichen modulin-ternen Elektronik entwickelt und umgesetzt. Diese wird mittels einer Erweiterungs-platine an die jeweiligen anwendungsspezifischen Modulkomponenten angepasst.

Eine einheitliche Elektronik ermöglicht die Kommunikation mit einer Steuerung so-wie die Kommunikation der Module untereinander. Durch die Verwendung eines Bus-systems ist das System modular erweiterbar. So können viele Module miteinander kombiniert und auf diese Weise Roboter mit einer unterschiedlichen kinematischen Struktur aufgebaut werden.

Die Energieversorgung erfolgt durch Lithium-Polymer-Akkus, welche in den Roboter integriert sind. Durch das autarke Design kann auf Schleppkabel zur Versorgung des Roboters mit elektrischer Energie verzichtet werden.

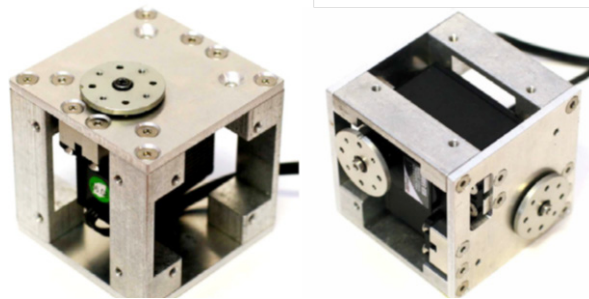


Abb. 65: CREST: Rotationsmodule. Links: Doppelrotationsmodul. Rechts: Rotationsmodul.

Bewegungsmodule

Die Bewegungsmodule dienen der Generierung der zur Fortbewegung notwendigen Momente und Stellwinkel. Im Rahmen des Projektes wurden zwei verschiedene Modultypen aufgebaut – ein Rotations- und ein Doppelrotationsmodul. Diese sind mit identischen Elektroantrieben ausgestattet und unterscheiden sich ausschließlich in ihrem mechanischen Freiheitsgrad. Während das Rotationsmodul nur einen Antrieb besitzt, wurden im Doppelrotationsmodul zwei Antriebe unter einem Winkel von 90° angeordnet.

Greifermodule

Im Rahmen des Projekts wurden drei verschiedene Greifermodule entwickelt: ein Magnet-, eine Finger- und ein Unterdruckgreifermodule. Das Magnetgreifermodule ist für das Greifen von ferromagnetischen Oberflächen geeignet. Die Greifkräfte werden mit Permanentmagneten erzeugt. Aufgrund der Gestaltung der Kontaktfläche am Greifer muss die Oberfläche des Substrates plan und glatt sein. Der Fingergreifer ist für das Greifen zylindrisch geformter Substrate geeignet. Ein Elektromotor erzeugt über ein hochübersetztes, selbstsperrendes Getriebe die Greifkräfte. Die Oberfläche ist mit reibungserhöhendem Material bedeckt. Der Unterdruckgreifer ist mit Saugnäpfen ausgestattet. Eine kleine Vakuumpumpe erzeugt den notwendigen Unterdruck. Der Greifer ist für das Greifen glatter und ebener Substrate geeignet.

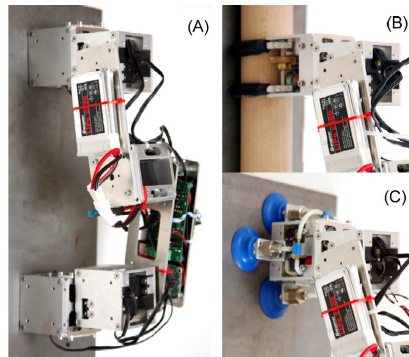


Abb. 66: CREST: Entwickelte und aufgebaute Greifmodule: A: Magnetgreifmodul, B: Fingergreifmodul und C: Unterdruckgreifmodul.

Durch Kombination verschiedener Greifer auf einem Roboter kann eine Kletterfähigkeit auf Substraten mit unterschiedlichen Parametern (zum Beispiel bzgl. Ebenheit, Magnetismus und Geometrie) erreicht werden.

Anwendungen des modularen Systems

Durch Kombination unterschiedlicher Module können Roboter mit unterschiedlicher kinematischer Struktur aufgebaut werden. Hier sind Roboter mit zwei oder mehr Greifern denkbar. Auch können Roboter mit unterschiedlichen Greifertypen an einem

System umgesetzt werden. So kann ein Roboter auf unterschiedlichen Substrattypen klettern.

Im Rahmen des Projektes wurden als Funktionsnachweis drei unterschiedliche Kletterroboter aufgebaut. Die Variante 1 eines modularen Kletterroboters ist kletterfähig auf zylindrischen Substraten. Der Roboter verfügt über zwei Fingergreifer und drei Rotationsmodule. Die Kletterexperimente wurden auf Substraten mit einem Durchmesser von 40 mm durchgeführt (siehe Abbildung 67). **Überprüft wurde dabei die Fähigkeit zum Klettern unter unterschiedlichen Winkeln.**

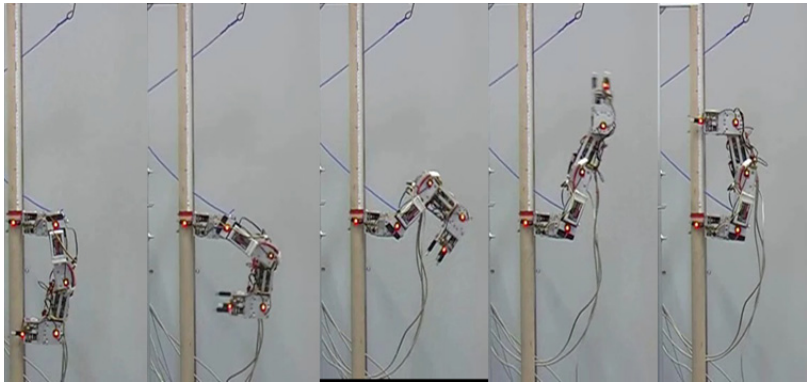


Abb. 67: CREST: Modulares Kletterrobotersystem zur Untersuchung des Überschlackkletterns.

Die zweite Variante des Kletterroboters ist fähig auf ferromagnetischen Substraten zu klettern, da es mit zwei Magnetgreifermodulen ausgestattet ist. Nachgewiesen wurde die Kletterfähigkeit auf Substraten bei unterschiedlichen Neigungswinkeln (siehe Abbildung 68).



Abb. 68: CREST: Modulares Robotersystem mit Magnethaftung beim "freien" Klettern in einer Laborhalle. Links: auf senkrechtem Substrat und rechts: über Kopf

Bei der dritten Variante wurde ein Kletterroboter mit zwei Magnetgreifern und zwei Fingergreifern sowie drei Rotationsmodulen ausgestattet und dessen Kletterfähigkeit auf zylindrischen und ferromagnetischen planaren Substraten nachgewiesen. Durch die Modularität kann eine Multifunktionalität erreicht werden, mit der sich das modulare System als Plattform für Untersuchung verschiedener Kletterstrategien eignet.

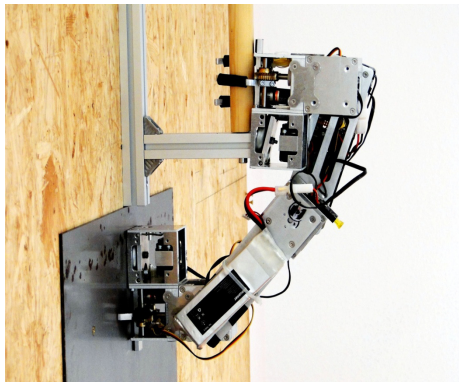


Abb. 69: CREST: Modularer Kletterroboter mit zwei Fingergreifern und zwei Magnetgreifern beim Wechsel des Substratstyps

Entwicklung der teilautonomen Robotersteuerung

Als Grundlage für die biologisch inspirierten Kletterstrategien wurde ein teilautonomer Betrieb des modularen Kletterroboters CREST realisiert. Als Entwicklungsplattform wurde eine mobile Variante mit zwei magnetisch haftenden Greifern und

einem Bewegungsfreiheitsgrad von $\text{DoF} = 5$ gewählt, welche für Klettern auf ebenen ferromagnetischen Flächen geeignet ist.

Die Autonomie sollte sich auf das Klettern, also die Lokomotion und die dafür erforderlichen Greifvorgänge beschränken. Das Konzept besteht darin, die geforderten Gesamtbewegungen in Teilbewegungen (Bewegungsprimitive) aufzuteilen. Diese sind so einfach gestaltet, dass sie durch einfache Regelkreise oder Zustandsmaschinen abgebildet werden können. Die Funktion der Regelkreise erfordert Distanzsensoren zur Messung des Abstandes vom Greifer zum Substrat. Der zweite wichtige Bestandteil des Konzepts beschreibt die Behandlung der Wechselwirkungen zwischen den Bewegungsprimitiven. Des Weiteren wurden Anforderungen und Konzept einer Kollisionsvermeidung dargestellt. Auf Grundlage der Konzepte wurden passende Sensoren ausgewählt. Hierfür wurden an die Anforderungen und Bedingungen des Roboters angepasste Kriterien aufgestellt und verschiedene Verfahren danach bewertet. Für die gewählten Prinzipien wurden die technischen Realisierungen und deren Eigenschaften vorgestellt. Weiterhin wurde die Integration der Sensorik auf einer Platine und deren Montage am Roboter beschrieben (siehe Abbildung 70).

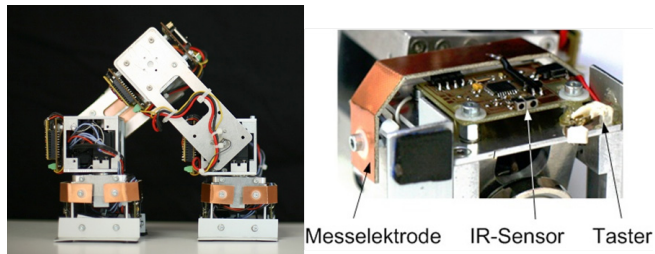


Abb. 70: CREST: Teilautonome Roboterplattform. Links. Gesamtsystem mit intelligenten magnetischen Greifern. Rechts: Sensorik bestehend aus kapazitiven, optischen und kapazitiven Messsystem zur Abstandsbestimmung und Objektlokalisation.

Die Sensorinformationen stellten die Grundlage für die Implementierung der Steuerungsalgorithmen dar. Da die Elektronik von CREST ein verteiltes Mikrocontrollersystem ist, bestand ein Schwerpunkt in der Aufgabenverteilung und Prozesssynchronisation. Neben den Steuerungsalgorithmen wurden auch die Software der Sensoren und ein einfaches Steuerungskonzept bzw. eine entwickelte Softwareschnittstelle zur Steuerung des Roboters kurz beschrieben.

Der Funktionsnachweis erfolgte in zwei Schritten. Zunächst wurde untersucht, ob die geforderte Funktionalität unter Standardbedingungen (z. B. ebenes Substrat) erreicht wurde. Im Anschluss wurden Experimente zur Adaptivität des Roboters durchgeführt. In den Versuchen konnte die Kletterfähigkeit auf ebenen und je nach Bewegungsmuster auch auf Substraten mit Hindernissen nachgewiesen werden. Es wurde gezeigt, dass Teilfunktionen autonom mit dem Roboter umgesetzt werden können. Grundsätzlich bietet das System die Grundlage, um den Grad der Autonomie weiter zu erhöhen.

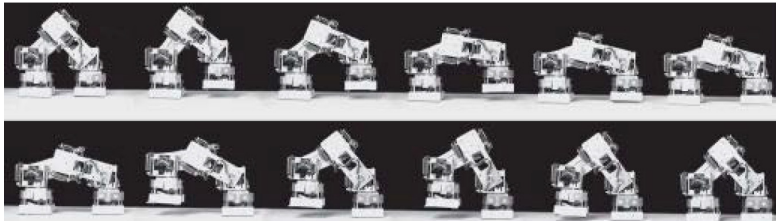


Abb. 71: CREST: Sequenzen autonomer Bewegung des Kletterroboters.

Mensch-Maschine-Schnittstelle

Für den teilautonomen Kletterroboter wurde eine Mensch-Maschine-Schnittstelle entwickelt, welche sich sowohl an den Bedürfnissen des Nutzers (Bediener) als auch an den technischen Anforderungen des Roboters orientiert. Das Bedienkonzept wurde in dieser Arbeit für die Steuerung in der Ebene angepasst. Generell wurde verifiziert, ob es überhaupt möglich ist, eine technische Struktur wie einen Kletterroboter im Gesamtfreiheitsgrad $\text{DoF} = 6$ intuitiv zu steuern.

Versuche haben gezeigt, dass sich das umgesetzte Konzept gut zur Steuerung des modularen Kletterroboters eignet. Es wurden verschiedene Kletterstrategien im Experiment überprüft und dadurch Potentiale für eine Weiterentwicklung des Systems identifiziert. Ein System zur Positions- und Lageerkennung des Kletterroboters wurde ausgelegt und umgesetzt. Durch diese beiden Erweiterungen besteht die Möglichkeit, das Konzept einer Eingabe von Absolutkoordinaten umzusetzen (Abbildung 72).

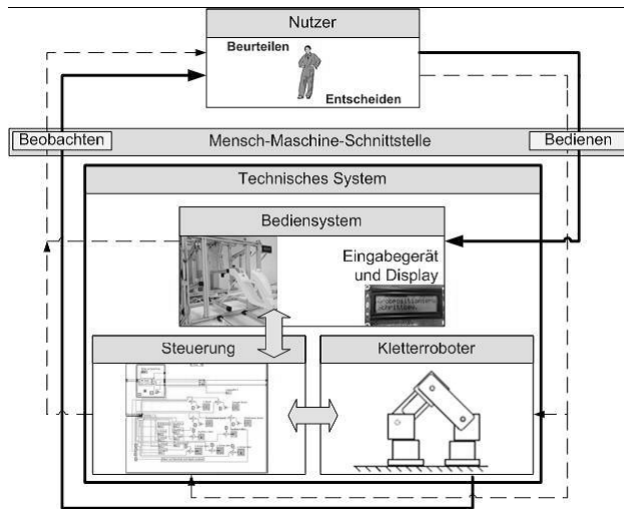


Abb. 72: Bedienkonzept des modularen Kletterroboters CREST.

2.1.9 Applikation von adhäsiven Strukturen auf Kletterrobotern

Skalierung der Plattform – von CREST zu CREST Nano

Für Integration auf Adhäsion basierender Strukturen in einen Kletterroboter wurden allometrische Betrachtungen an der modularen Plattform „CREST“ durchgeführt. Es zeigt sich, dass eine Applikation adhäsionsbasierter Greifer nicht auf der relativ großen Plattform des modularen Systems möglich ist. Die Mechanik wurde skaliert, die dafür notwendigen allometrischen Betrachtungen bezogen auf die Festigkeit, Elastizität sowie die Antriebsgrößen wurden durchgeführt. Erreicht wurde eine Größenskalierung von 2:1. Die Masse reduziert sich dabei von ca. 1,6 kg auf 0,1 kg.

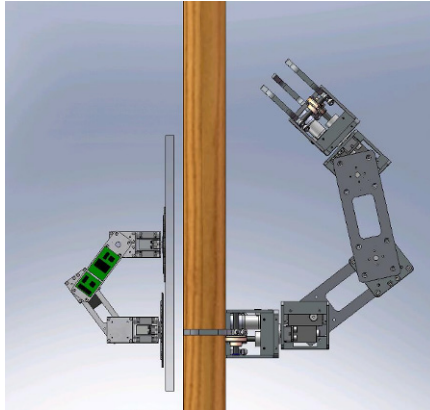


Abb. 73: CAD-Darstellung der skalierten Plattform CREST Nano im Vergleich zur Plattform CREST. Das Verhältnis der Massen beträgt CREST nano: CREST = 100 g/1600 g. Die Struktur wiegt ohne Haftstruktur mit provisorischer Elektronik ca. 60 g.

Für die Herstellung der Teile wurde ein spezieller Kunststoff ausgewählt, der sowohl den Fertigungs- als auch den Funktionsansprüchen genügt. Die Aktoren sind Miniatur-Servoantriebe. Bereits aufgebaut ist eine Struktur mit dem mechanischen Freiheitsgrad $\text{DoF} = 3$ für die Fortbewegung auf einer ebenen Fläche (Abbildung 73). Herausforderung war die Anpassung der Elektronik. Es wurde ein Gewicht von 60 g der Struktur inkl. Energieversorgung und einer vorläufigen Elektronik exklusive der Haftstrukturen erreicht. Das Erreichen des Ziels einer Gesamtmasse von unter 100 g ist möglich.

Im Vergleich zu anderen auf Adhäsion basierten Systemen stellt sich eine gute Ausgangssituation für die Umsetzung des angestrebten Klettersystems dar.

Entwicklung der Prototypen eines auf trockener Adhäsion basierenden Haftsystems

Die Entwicklung der Prototypen eines auf trockener Adhäsion basierenden Haftsystems basiert auf pilzförmigen Haftstrukturen der organismischen Natur, welche sich beispielsweise an Insektenfüßen wie diverse Käferarten oder Fliegen befinden (s. o.). Das Wirkprinzip solcher pilzförmiger adhäsiver Haftstrukturen ist eine Kombination

aus molekularen Kräften (nach derzeitiger Erkenntnislage van-der-Waals-Kräften) und einer Kraft infolge eines sich zwischen Substrat und anliegender Haftstruktur aufbauenden Unterdrucks. Dabei ist der Anteil beider Kräfte an der Gesamthaftkraft von der Größe des Haftsystems abhängig. Auf Basis durchgeführter Berechnungen zeigt Abbildung 74 den Zusammenhang zwischen van-der-Waals-Kraft und einer sich aufgrund des Unterdrucks ergebenden Zwangskraft in Abhängigkeit der Radien r_e und r_s .

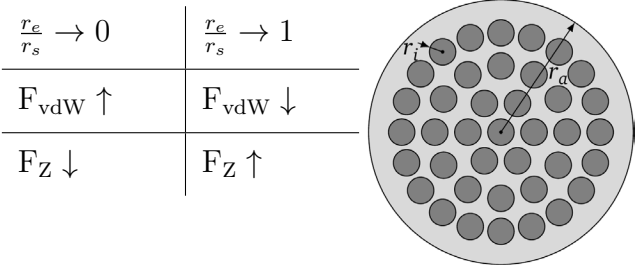


Abb. 74: Zusammenhang von r_s und r_e . Bei $r_e/r_s \rightarrow 0$ überwiegt der Anteil der van-der-Waals-Kraft (F_{vdW}) an der Haftkraft, bei $r_e/r_s \rightarrow 1$ überwiegt die Zwangskraft (F_Z) infolge des sich aufbauenden Unterdrucks.

Die oben beschriebene mikrostrukturierte Polymerfolie ist dabei in dem Bereich einzuordnen, in welchem die Haftkraft durch die van der Waals-Kraft dominiert wird. Zum Vergleich wurde an der TU Ilmenau eine **Makroskopisch-Pilzförmige-Silikon-Haftstruktur** (nachfolgend MPS-Haftstruktur genannt) entwickelt, bei welcher die Haftkraft hauptsächlich durch den Unterdruck bestimmt wird. Dabei setzt die Entwicklung der MPS-Haftstruktur die Vorarbeit von (Gorb et al., 2007) fort.

Das Design der aktuellen MPS-Haftstruktur sowie die mittels einer Zwick/Roell Z 005 Zugkraftmessmaschine aufgenommene Abziehkraft (welche der Haftkraft der Struktur entspricht) zeigt Abbildung 75.

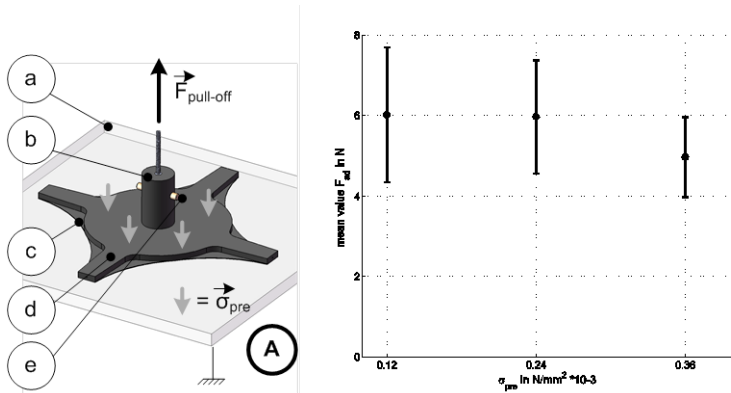


Abb. 75: CAD-Zeichnung des Experimentalsetups: a = Glasträger, b = MPS-Haftstruktur, c = kontaktunterstützende schwimmhautähnliche Strukturen, d = Abschälfahnen, e = Splint zur Vermeidung von Torsion innerhalb der späteren mechanischen Peripherie. Rechts: Ergebnisse des Zugkraftversuchs, dargestellt sind Mittelwert der Zugkraft und die Standardabweichung in Abhängigkeit der benötigten Vorspannung (in $\text{N}\cdot\text{mm}^{-2}$) (FREMERY, M. 2010).

Für die Herstellung mittels Gießen wurde das Zwei-Komponentensilikon WM 372 (Fa. Weißmetall, Wuppertal) verwendet. Damit erreicht die MPS-Haftstruktur eine gemittelte Haftkraft von 6 N. Dieser Wert ist bei Aufprägung einer gleichmäßig verteilten Vorspannung von mindestens $0,12 \cdot 10^{-3} \text{ N}\cdot\text{mm}^{-2}$ reproduzierbar, die geringe Vorspannung resultiert aus der kontaktunterstützenden Wirkung der schwimmhautähnlichen Strukturen (c in Abbildung 75). Die weit verteilte Standardabweichung sowie die Verringerung des Mittelwertes bei einer Vorspannung von $0,36 \cdot 10^{-3} \text{ N}\cdot\text{mm}^{-2}$ sind auf Fertigungsfehler bei der Zentrierung des Zugdrahtes, an dem die Zugkraft angreift, zurückzuführen.

Systemintegration neuer adhäsiver Materialien auf die Versuchsplattform

Integration der MPS-Haftstruktur

Die Integration der MPS-Haftstruktur erfolgt auf einem Modul, dessen Schnittstellen kompatibel zur CREST Nano-Struktur ausgeführt sind. Die implementierte Mechanik gewährleistet, teilweise in Interaktion mit der übrigen Roboterstruktur, die Phasen der Positionierung zum Substrat, die Herstellung, das Aufrechterhalten sowie

das Lösen des Kontaktes. Den Funktionsnachweis des adhäsiven Haftmoduls zeigt Abbildung 76 A und B anhand der Phasen der Kontaktherstellung und des Lösens des Kontaktes.

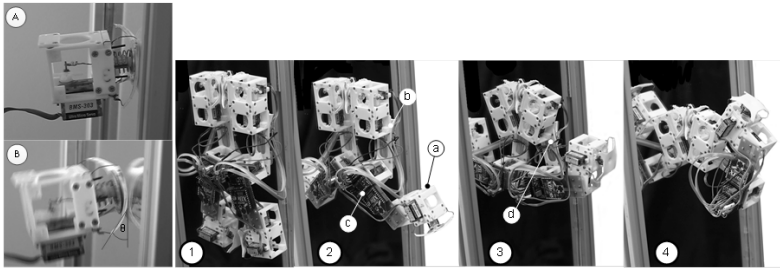


Abb. 76: CREST Nano. A und B: Phasen des Herstellens und Lösens des Kontaktes. 1-4: Integration des Haftmoduls auf CREST Nano (FREMERY, M. 2010).

Die Integration auf einem Kletterroboter zeigt Abbildung 75 1-4. Für eine zuverlässige Lokomotion ist allerdings die Momentenkompensation des Haftmoduls noch zu überarbeiten.

Neben einem Einsatz innerhalb der mobilen Robotik ist das adhäsive Haftmodul auch als Manipulator einsetzbar. Abbildung 77 zeigt das adhäsive Haftmodul beim energie-losen Halten von siliziumbasiertem Material (Trägermaterial) mit Zusatzgewicht (insgesamt 420 g, Masse des „Greifers“ 25 g)



Abb. 77: CREST Nano: Adhäsives Haftmodul als Greifer, hält ohne Leistungszufuhr Glasplatte mit Zusatzmasse. Gesamtmasse der Last 420 g (FREMERY M., 2010).

Integration der mikrostrukturierten Polymerfolie für fahrende Lokomotion

Zur Validierung der prinzipiellen Eignung der mikrostrukturierten Folie der Forschungsgruppe Gorb für Zwecke der Kletterrobotik wurde diese auf dem kettengetriebenen Leichtbauroboter MaTBot (**M**agneto-**a**dhesive-**T**rack-**r**o**B**ot) integriert. Die Masse des Roboters beträgt derzeitig inklusive Steuerung und Energieversorgung ca. 60 g.

Grundlage für die Wahl eines solchen Roboters waren Vorversuche hinsichtlich der Implementierung und Handhabung der Folie. Dabei wurden die besten Eigenschaften hinsichtlich des Haltens und des LöSENS des Kontaktes durch längliche Folienstreifen erzielt (Länge einer Koordinatenrichtung >> als die beiden anderen).

Ebenfalls wurden Versuche zur Anbindung der mikrostrukturierten Folie an/auf andere Materialien durchgeführt, dabei konnte eine sehr gute Klebeverbindung zwischen Folie und dem Zwei-Komponentensilikon WM 372 erzielt werden.

Die gewonnenen Erkenntnisse wurden anschließend für die Konstruktion einer geschichteten Kette verwendet, welche einerseits das Antriebsmoment für die Lokomotion auf das Substrat überträgt und andererseits die für das Klettern erforderliche Haftkraft liefert (Phase der Interaktion mit dem Substrat: „Halten“).

Dabei ermöglicht die Spurführung der Kette die Realisierung weiterer Phasen der Interaktion mit dem Substrat, im Detail die Kontaktherstellung sowie das LöSEN des Kontaktes.

Infolge des kontinuierlichen Kettenumlaufs ist es weiterhin geplant, die nicht im Eingriff befindliche Seite der Kette im laufenden Betrieb zu reinigen und so deren Einsatzdauer zu verlängern.

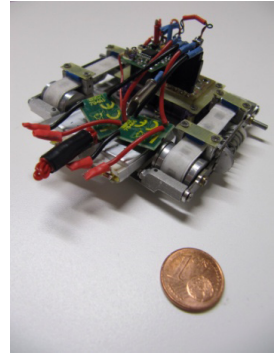
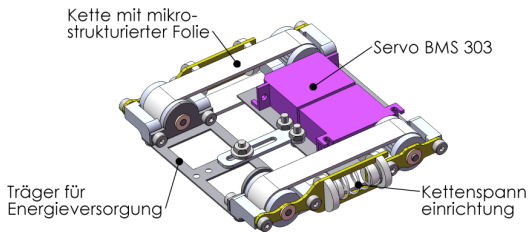


Abb. 78: MaTBot mit fahrender Fortbewegung und biologisch inspirierten adhäsiven Haftstrukturen. Links: CAD-Zeichnung. Rechts: Prototyp mit integrierter Elektronik und Energieversorgung (FREMERY M. et al., 2011)

Die hierbei für die Herstellung der geschichteten Kette gewählte Vorgehensweise zeigt Abbildung 78. Zunächst erfolgt das Gießen (Vorrichtung A) eines geraden Kettenstücks mit Struktur. Ziel der Strukturierung ist die Erhöhung der Reibung zwischen Antriebsritzel und Kette. Anschließend wird das Kettenstück auf das richtige Endmaß abgelängt, die freien Enden werden unter Verwendung der Vorrichtung B verbunden. Als letzter Schritt erfolgt die Implementierung der mikrostrukturierten Folie mittels Verkleben mit 2K-Silikon. Verwendetes Material ist WM 372.



Abb. 79: Werkzeuge zur Herstellung der Kette mit biologisch inspirierten adhäsiven Strukturen im Laminierverfahren. (FREMERY et al., 2011)

Die experimentelle Untersuchung des Roboters und somit der Funktionsnachweis der mikrostrukturierten Kette in einem integrierten System findet auf einem Versuchsstand statt, welcher ein definiertes Justieren des Substratneigungswinkels ermöglicht. Tabelle 9 zeigt die erzielten Ergebnisse in Abhängigkeit des jeweiligen Neigungswinkels. Zu jedem Neigungswinkel wurden fünf Versuche gefahren, dabei gilt ein Versuch als erfolgreich (●) wenn MaTBot eine definierte Strecke, hier 30 cm, ohne Rutschen oder Gleiten zurücklegen kann.

Als Substrat wurde gewöhnliches Fensterglas verwendet; für gleichbleibende Bedingungen fand ein Reinigen des Substrates bei jedem neuen Neigungswinkel statt.

Tab. 9: Maximaler Neigungswinkel mit stabiler Kletterbewegung von MaTBot auf Fensterglas

	NEIGUNGSWINKEL [°]																
LAUF	5	10	15	20	25	30	35	40	45	50	55	60	61	62	63	64	65
1	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●				
2	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●				
3	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●			
4	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●		
5	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●		

Dabei zeigen die Untersuchungen ein sicheres Klettern von MaTBot im Bereich von 0° bis 61°. In Einzelfällen konnte ein Neigungswinkel bis 64° erreicht werden. In allen Fällen war der Roboter voll manövrierfähig.

Integration der mikrostrukturierten Polymerfolie in einen Mechanismus für schreitende Lokomotion

Beim Klettern an glatten Substratoberflächen wird den Funktionsmechanismen der trockenen Adhäsion (Gecko-Prinzip) eine besondere Bedeutung beigemessen. Bei diesen Haftmechanismen kann auf zusätzliche Antriebe (z.B. für die Erzeugung von Vakuum bei Saugnäpfen) verzichtet werden. Für die Funktionstests wurde von Prof. Gorb eine spezielle „Gecko-Folie“ bereitgestellt.

Die Bewegung von zwei Haftpads wird über einen speziellen Koppelmechanismus durch einen durchlaufenden Antrieb erzeugt (siehe Abbildung 80). Der Mechanismus der Pad-Kontaktierung erlaubt ein flaches Aufsetzen der Pads und ein definiertes Abziehen beim Abheben. Der pendelnde Schwanz (mit Batterie) dient zum

Gewichtsausgleich beim senkrechten Klettern bzw. zur Erzwingung eines Richtungswechsels. Über zwei "absolute" Drehlagensensoren werden jeweils die Position der Pads und die Position des Schwanzes kontrolliert und definiert gesteuert. Durch ein eingebautes Mikrophon können über Töne Kommandos zum Richtungswechsel gegeben werden.

Technische Parameter:

- Gewicht: ca. 60 g, mit Elektronik und Batterie
- Höhe: ca. 20 mm,
- Breite der Stützen: ca. 50 mm
- Gesamtlänge mit Schwanz: ca. 140 mm

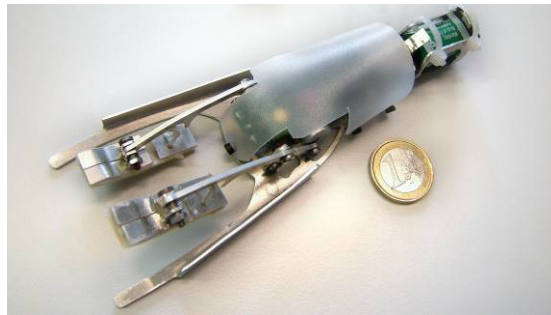


Abb. 80: Prototyp eines Kletterroboters mit Haftfolie für schreitende Lokomotion.

2.2 Verwertbarkeit

2.2.1 Industrielle Verwertung (TETRA)

Anwendungen des RatNic-Systemkonzeptes

Mit den Demonstratoren konnte TETRA nachweisen, dass die Idee einer bionisch inspirierten Robotik auch für die Industrie technisch gleichermaßen umsetzbar wie sinnvoll ist und für spezifische Anwendungsfälle deutliche Nutzeffekte bringt. Das methodische Vorgehen während des bionischen Entwicklungsprozesses konnte von TETRA auch bereits bei anderen Projekten angewendet werden. Dies bezieht sich insbesondere auf die Leichtbau-Mechatronik und den geringen Energieverbrauch z.B. bei autonom agierenden Systemen.

Für die RatNic-Technologie gab es aus den verschiedensten Anwendungsgebieten erste Anfragen, die eine Weiterentwicklung zu einem Spezialsystem vorsehen können.

- Assistenz- und Servicetechnik für Gebäude (z.B. Reinigung, Inspektion)
- Assistenztechnik bei der Montage in engen technischen Gebilden (z.B. Flugzeugflügel)
- Assistenztechnik bei der Inspektion von Energie- und Chemieanlagen (z.B. Kamerainspektion an Hochspannungsmasten, Gas-Schnüffler in Chemieanlagen)
- Ultraleicht-Robotiksysteme für mobile Plattformen (z.B. radgebundene Systeme, Ballone, Quadrocopter)

Das aufgebaute Know-How wird auch für Teilprodukte und andere Anwendungen genutzt. Dies bezieht sich insbesondere auf die konstruktiven Entwurf von Gesamtsystemen, die Greifmechanismen, die Steuerungselektronik und die Software zur Steuerung und Regelung elastischer, sehnensbasierter Robotersysteme.

- Experimentierplattformen für das tierische und menschliche Laufen
- Smart-Gripper für Leichtbauroboterarme (Leichtbaugreifer mit sensorischen Fähigkeiten von RatNic)

- Greifmechanismen in der Industrieautomation (insbesondere Kontaktmaterialien beim Handling von Glasteilen)
- MicroEncoder (Kompakte Encoderbaugruppe zum Einbau in UL-Bewegungssysteme)

Aufbau eines neuen Geschäftsbereiches „Robnics“ (Robots by Nature Inspired Technics)

Mit dem Aufbau des Geschäftsbereiches werden folgende Ziele avisiert:

- Fertigung und Vertrieb elastisch verkoppelter Bewegungssysteme für die Bereiche Handhabung, Assistenz und Inspektion
- Langfristige Bindung von Entwicklungs- und Fertigungskapazitäten im eigenen Unternehmen
- Ausbau der Mechatronik-Fertigung
- Aufbau von Vertriebs- und Marketingstrukturen
- Schaffung von Referenzlösungen zur Technologiedemonstration
- Erweiterung des Technologienetzwerkes
- Akquisition neuer potenzieller Kunden

Kurzfristiges Hauptziel

Demonstration der Verfügbarkeit des technologischen Know-Hows für die Weiterentwicklung des Kletterroboters und für die Entwicklung weiterer anwendungsspezifischer Robotersysteme als Trägen für Sensor-, Inspektions- und Bearbeitungseinheiten.

Know-How-Aufbau

In folgenden Bereichen wurde Know-How aufgebaut:

- Leichtbaukonstruktion
- Elastisch verkoppelte Zugmittelgetriebe mit nichtlinearen Federeigenschaften
- Absolut-Drehwinkelgeben auf der Basis von Hall-Elementen
- Kompakte und integrierte Steuerungselektronik mit geringem Energieverbrauch
- Software zur Steuerung verkoppelter und nichtlinearer Bewegungssysteme

2.2.2 Verwertung der Ergebnisse (FG Biomechatronik)

Die robotische Lokomotion in unstrukturiertem Gelände wird auch in Zukunft ein Schwerpunkt in Forschung und Lehre sein und bietet eine langfristige Forschungsperspektive.

Fortschreibung der Forschung in Bereich Robotik

Angesichts der unstetigen Förderung der Robotik in Deutschland ist die Biologisch inspirierte Robotik Kernelement der Strategie „Research by Master Students“ (Abb. 80). Industrie-nahe Projekte wie „InspiRat“ oder Industrieprojekte wie „AirArm“ (Festo, Esslingen) können daher spontan auch bei den heute nicht unüblichen nachträglichen Bewilligungen übernommen werden, da „anqualifiziertes“ Personal jederzeit zur Verfügung steht, während die eingearbeiteten Wissenschaftler aufgrund der unstetigen Forschungsförderung in Deutschland nicht immer ad hoc zur Verfügung stehen.

Nachdem wir in BMBF „VIP“ eine Rücknahmeempfehlung für ein weiter aufbauen des Kletterrobotik-Projekt erhalten haben (wir müssen ja angesichts des Fortfalls einer geordneten Bionik-Förderung jedes Mal neue Gutachter „bionisch missionieren“, das gelingt nicht immer und führt bei beschränkter Personalkapazität der Geldbeschaffung zum „Winterschlaf“ erfolgreicher Themen) ist die aktuell prioritäre Erweiterung des Forschungsspektrums die Weiterentwicklung unserer biologisch inspirierten Schwimmroboter vom Typ „Seeschlange“. Dieses modulare System bietet die Möglichkeit zur Simulation der in der Biologie diskutierten Schwimmtypen vom Aal

(„anguiliform“) bis zum Thunfisch („thunniform“), und erlaubt erstmals bei ansonsten konstant gehaltenen Parametern die Überprüfung der aus der biologischen Beobachtung abgeleiteten Hypothesen zum tierischen Schwimmen. Damit könnte das ewige Versprechen der Belohnung der Biologen für das Engagement in der Bionik durch Verfügbarkeit bioanaloger Experimentalplattformen eingelöst werden. Dank extremer Unteraktuierung und gezielter Nutzung der Nachgiebigkeiten im System und gegenüber dem Medium Wasser erfährt das Thema derzeit Exzellenzförderung durch die TU Ilmenau und hat gute Chancen, von der DFG weiterfinanziert zu werden.

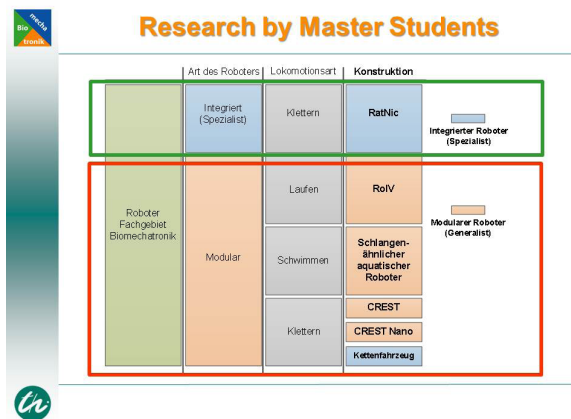


Abb. 81: Aktuelle Objekte der Strategie „Research by Master Students“.

Verwertung in studentischer Lehre

Die Ergebnisse des Projekts „InspiRat“ finden Eingang in das Masterstudium „Mechatronik“ in der Vertiefungsrichtung „Biomechatronik“ der TU Ilmenau. Die Kletterrobotik bildet einen Schwerpunkt in der Vorlesung „Biomechatronik 1“. Den Studenten werden sowohl biomechanische Grundlagen des Kletterns als auch das mechatronische Konzepte moderner Kletterroboter nahe gebracht. Neben dem Vermitteln der theoretischen Grundlagen wird Studenten in Praktika der Zugang zu dem komplexen mechatronischen System „Kletterroboter“ ermöglicht, damit sie praktische Erfahrungen sammeln können. Das studentische Interesse an der Thematik spiegelt sich

zahlreichen Studiums-begleitenden und -abschließenden Qualifikationsarbeiten wider, die bereits erfolgreich abgeschlossen wurden bzw. auch nach Ende des Projekts noch weiter bearbeitet werden.

2.2.3 Verwertung der Hochgeschwindigkeits-Röntgenvideographieanlage (FSU Jena)

Die Hochgeschwindigkeits-Röntgenvideographieanlage wird einerseits für Projekte am Institut für Spezielle Zoologie und Evolutionsbiologie ausgiebig genutzt (Tab. 10). Zum anderen sind vielfältige Kooperationen entstanden und eine Reihe von Arbeitsgruppen aus dem In- und Ausland nutzen die Anlage als zahlende Kooperationspartner (Tab. 11).

Tab. 10: Nutzung der Hochgeschwindigkeits-Röntgenvideographieanlage für Projekte am Institut für Spezielle Zoologie und Evolutionsbiologie, FSU Jena. (S. 128/129)

Projektbeteiligte	Inhalt der Studie	Förderung	Bemerkungen
M.S. Fischer, K. Lilje	Fortbewegung verschiedenster Hunderassen	DFG, gkf, VDH	Buch: Hunde in Bewegung / Dogs in motion, Kosmos
N. Schilling, K. Wachs	Wirbelsäulenbewegungen beim Hund	BGN	in Kooperation mit der TiHo Hannover
M.S. Fischer, A. Schmidt	Fortbewegung von Rüsselspringern		
M.S. Fischer, N. Schilling, D. Arnold	Störung der Fortbewegung bei Ratten	darpa	
M. Schmidt, H. Witte, k. Zimmermann	Die Bedeutung des Ferntastsinnes durch Sinushaare für die Kontrolle der Fortbewegung	DFG	
N. Schilling, J. Neufuß	Bewegungsumfang in der Wirbelsäule eines Schimpansen		
M.S. Fischer, A. Stößel	Fortbewegung von Wachteln, Dohlen und Tinamous		

noch Tab. 10:

Projektbeteiligte	Inhalt der Studie	Förderung	Bemerkungen
J.A. Nyakatura, B. Kilbourne, M. Hergeth	Fortbewegung verschiedenster Vogelarten	DFG	In Kooperation mit dem Lehrstuhl für digitale Bild- verarbeitung Jena
N. Schilling, S. Moritz	Fortbewegung von Le- guanen und Waranen	BGN, DFG	
J.A. Nyakatura, V. Allen, S. Curth	Fortbewegung von Leguanen und Skinken	VW Stiftung	in Kooperation mit der Stif- tung Schloss Friedenstein Gotha
M.S. Fischer, M. Mehlhorn	Fortbewegung von Schildkröten		
M. Schmidt	Einfluss der Beinme- chanik auf die Mecha- nik des Rumpfes bei Säugetieren		
K. Kupczik	Biomechanik der Kaubewegungen bei Hunden	MPI	

BGN: Berufsgenossenschaft Nahrungsmittel und Gastgewerbe, darpa: Defense Advanced Research Projects Agency, USA , FG: Deutsche Forschungsgemeinschaft, gkf: Gesellschaft zur Förderung Kynologischer Forschung e.V., VDH: Verband für das Deutsche Hundewesen
VWStiftung: VolkswagenStiftung, MPI: Max Planck Institut

Tab. 11: Zusammenarbeit mit Arbeitsgruppen aus dem In- und Ausland als zählende Kooperationspartner zur Nutzung der Hochgeschwindigkeitvideographie-Anlage, FSU Jena.
(S. 130/131)

Kooperationspartner	Inhalt der Studie	Institution
<i>Kooperationen</i>		
R. Böttcher, J. Rey, M.S. Fischer	Fortbewegung von gesunden Hunden, sowie von kranken Hunden vor und nach einer Operation	Universitätstierklinik Leipzig
I. Pfeil, M.S. Fischer	Fortbewegung gesunder und kranker Hunde	Tierärztliche Klinik Dresdner Heide
C. Stefen, M.S. Fischer	Kauen beim Biber	Museum für Naturkunde Dresden
M. Schmidt, D. Liebetanz, A. Kutschenko	Neuromechanik bei lokalisiertem Tetanus	Universitätsmedizin Göttingen
M. Knieling, M. Schmidt	Greifen bei Ratten vor und nach Schlaganfall	Univeritätsklinikum Jena
M. Schmid, M. Böttger, J. Leuchtweis	Diagnostisches Potential einer differenzierten Bewegungsanalyse in der Schmerzforschung	Institut für Physiologie & Bayer Pharma AG, Forschungszentrum Elberfeld (Förderpreis für Schmerzforschung der Deutschen Schmerzgesellschaft e. V. 2012)
W. Bothe	Herzfunktion beim Schaf	Universitätsklinikum Jena
R. Berthe, T. Kohl, M.S. Fischer	Fressen und Speien bei der Speikobra	Rheinische Friedrich-Wilhelms- Universität Bonn
S. Deban, N. Schilling	Fressen bei Salamandern	University of South Florida, Tampa, USA
J.-M. Cabelguen, A.J. Ijspeert, K. Karakasiliotis, N. Schilling	Fortbewegung von Salamandern	École polytechnique fédérale de Lausanne, Schweiz

noch Tab. 11:

Kooperationspartner	Inhalt der Studie	Institution
A. Haas, S. Griep, N. Schilling	Absprung bei Kröten	Universität Hamburg
<i>zahlende Kooperationen</i>		
H.-Ch. Scholle, Werner, Förster	Atmen und Schlucken beim Schwein	Universitätsklinikum Jena, Med-El, Innsbruck, Österreich
I. Irmiler	Fortbewegung von Mäusen mit Arthrose	Universitätsklinikum Jena
F. Goller	Gesang bei Zebrafinken	University of Utah, Salt Lake City, USA
	Bewegung einer Roboter- qualle, AirArm, Greifen und bipedes Laufen bei Ratten	<i>Festo</i> , Esslingen
	Springen, Fallen und Landen bei Katzen	BBC, London, UK

2.2.4 Verwertung Kontaktmechanismen (CAU Kiel)

Mit 35 wissenschaftlichen Publikationen, über 15 Beiträgen in Printmedien und über 10 Film- und Hörfunksendungen wurde während des Projektes ein Beitrag zur nachhaltigen Sensibilisierung, Information und Involvierung einer sehr breiten Öffentlichkeit bezüglich der Thematik „Bionik und Kletterrobotik“ geleistet.

Angefangen beim Bildungssektor, über den wissenschaftlichen Bereich bis hin zur Industrie steht einem großen Anwenderkreis somit eine solide Basis von Forschungsergebnissen, (Daten, Grundlagen, Zusammenhänge usw.) zur Verfügung. Langfristig werden interdisziplinäre komplexe Ansätze und systemare Denkweisen geschaffen, geschult und erhalten.

2.2.5 Wissenschaftliche und/oder technische Erfolgsaussichten

Der herausragende Erfolg des Verbundprojekts „Inspirat“ beruht auf seinem (gelebten und nicht nur postulierten) integrativen Ansatz. Wissenschaft und Technik agieren transdisziplinär zusammen. Die enge Zusammenarbeit und aktive Rückkopplungen der Projektpartner und die Bereitstellung neuester Materialien und Ergebnisse erlaubte und erlaubt es, Fragestellungen exakter zu fokussieren und den Transfer in die Technik zu beschleunigen.

2.2.6 Wissenschaftliche und wirtschaftliche Anschlussfähigkeit

Die wissenschaftliche und wirtschaftliche Anschlussfähigkeit steht außer Zweifel. Die kooperative transdisziplinäre Forschung und technische/wirtschaftliche Umsetzung, eine vielschichtige Vernetzung, und auch projektbezogene Lehre, Bildung und Öffentlichkeitsarbeit wurden intensiviert.

Konstruktive Interaktionen mit den Projektpartnern und darüber hinaus beschleunigen Rückkopplungen und Einfluss von Know-how in innovative Produkte und Verfahren. Mit der Innovationskraft wachsen Wettbewerbsfähigkeit und damit das Potenzial für die Schaffung neuer Arbeitsplätze am Industriestandort Deutschland.

Die vom Wirtschaftsministerium des Freistaates Thüringen bei Roland Berger & Partner in Auftrag gegebene „Roadmap“ der technologischen Entwicklung benennt explizit den Aufbau eines Zentrums für Servicerobotik in Ilmenau als empfohlene strategische Maßnahme.

2.3 Fortschritte anderer Stellen auf dem Gebiet des Projektes

2.3.1 Fortschritt aus industrieller Sicht

Die Analysen des internationalen technischen Standes und der im Rahmen von Forschungsprojekten laufenden Arbeiten zeigen die folgenden Trends auf:

- 1) Die Industrierobotertechnik ist für die industrielle Fertigung ein unerlässlicher Bestandteil, deren Anwendung deutliche Wettbewerbsvorteile bringt. Neue Nachfragefelder ergeben sich aus der Fertigung von Mikroprodukten und aus der Biotechnik (Reinraum, Vakuum, Tieftemperatur).
- 2) Zukünftige Wachstumsfelder der Robotik werden für die Erfüllung von Service- und Assistenzaufgaben sowohl in der Industrie als auch im Medizin- und Sicherheitsbereich und in der privaten Anwendung zu Hause gesehen.
- 3) Durch die Anwendung bionischer Funktionsprinzipien in Service- und Assistenzrobotern kann die Mobilität, die Beweglichkeit, die Robustheit deutlich erhöht und die Herstellungskosten derartiger Systeme deutlich reduziert werden.
- 4) In Bezug auf die Service- und Assistenzrobotik ist die Großindustrie noch zurückhaltend (abgesehen von Staubsaugrobotern oder militärischen Robotern).

Somit kann festgestellt werden, dass sich TETRA mit dem InspiRat-Projekt als Industrieunternehmen einen deutlichen Wissensvorsprung erarbeitet hat, der weiter ausgebaut werden muss und mittelfristig in Serienprodukte zur Refinanzierung der Entwicklungsaufwendungen mündet. Kommerziell angewendete Systeme der Kletterrobotik (selbst Fensterputzroboter) sind nicht bekannt. Es kann weiterhin von starken Alleinstellungsmerkmalen sowohl die Konstruktion als auch die Applikation betreffend ausgegangen werden.

2.3.2 Entwicklungen im Bereich der Kletterrobotik

Gegenüber dem Stand der Wissenschaft und Technik bei Erstantragstellung 2006 sind international folgende Weiterentwicklungen zu berichten. Dabei wird nur auf als wichtige Neuerungen sowie auf direkt das Projekt „InspiRat“ betreffende Entwicklungen eingegangen.

RI Robotics - Elektroadhäsion

Auf der International Conference on Robotics and Automation (ICRA) 2008 wurde das Prinzip der Elektroadhäsion vorgestellt. Durch das Erzeugen eines elektrischen Feldes und der dadurch entstehenden Kräfte wird die Adhäsionswirkung zwischen Haftelement und Oberfläche verstärkt (siehe Abbildung 82). **Nachteil sind die hohen Spannungen** von ca. 2000 V, die benötigt werden. Erzeugt wird nach (Prahlad, 2008) eine Haftspannung von etwa $1,5 \text{ N/cm}^2$.

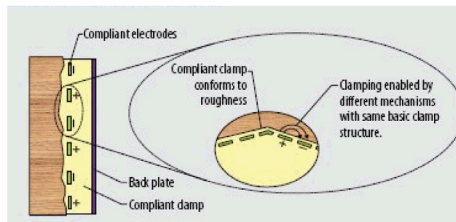


Abb. 82: Prinzip der Elektroadhäsion – durch das Erzeugen eines elektrischen Feldes wird die Adhäsionswirkung zwischen Haftelement und Oberfläche verstärkt. Nachteil sind die hohen Spannungen von ca. 2000 V, die benötigt werden (PRAHLAD, 2008).

Eigenschaften

- Geringe Leistungsaufnahme ($P = 20 \text{ mW/N}$)
- Hohe Spannungen ($U = 2000 \text{ V}$)
- Schneller Kraftauf- und -abbau ($t = 50 \text{ ms}$)
- Robust gegenüber Schmutz
- Empfindlich gegenüber Feuchtigkeit

Einschätzung

Der Haftmechanismus der Elektroadhäsion zeichnet sich durch hohe und robuste Haftung aus, allerdings ist die Verwendung der hohen Spannungen und der damit verbundenen elektromagnetischen Strahlung sowie der Sicherheitsaspekte als problematisch einzuschätzen. Auch erreicht das durch die Gruppe Gorb entwickelte Material ähnliche Haftkräfte wie die Elektroadhäsion. So wird ein Einsatz nicht in Betracht gezogen.

DigBot – Ein mit Krallen kletternder Roboter

Auf der ClaWaR 2009 wurde von der Gruppe Quinn der Cleveland Case Western University der DigBot vorgestellt. Der Roboter kann mit Hilfe von Haken klettern und ist dabei unabhängig von der Orientierung des Substrats. Das Substrat ist ein Metallgitter, mit dem sich die Haken formschlüssig verbinden (Abbildung 83).

Eigenschaften

- Formschlüssige Verbindung
- Substrat: Metallgitter, planar
- Plattform: sechsbeiniger Roboter

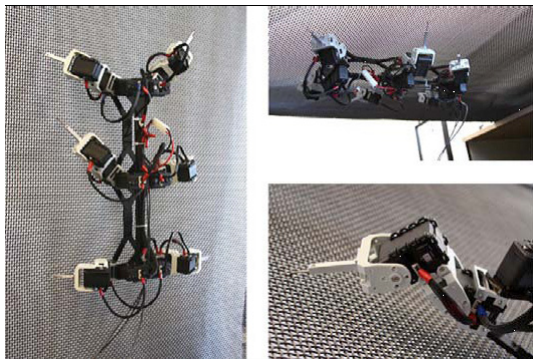


Abb. 83: DigBot klettert auf einem Metallgitter und hakt sich auf diesem formschlüssig ein. Die Funktionalität ist dabei unabhängig von der Orientierung des Substrates. PALMER, L. R.; DILLER, E. D.; QUINN, R. D.: Design Aspects of a Climbing Hexapod. In: Proceedings of 12th International Conference on Climbing and Walking Robots 2009.

Einschätzung

Das Prinzip des Einhakens konnte bis jetzt nur erfolgreich auf dem Metallgitter umgesetzt werden. Eine Verwendung auf Kabeln und Rohren ist nicht möglich, einerseits haben die Rohre nicht die Materialeigenschaften, dass dies funktionieren könnte. Andererseits besteht die Gefahr der Beschädigung von Substraten, was auch als negativ einzuschätzen ist. Auf weichem Material wie zum Beispiel Baumrinde ist das Einsatzpotential von Krallen als groß zu sehen.

3D-Climber

Der Roboter 3D-Climber der Universität Coimbra, Portugal ist ein Klettersystem, welches an künstlichen Strukturen mittels Kraft- und Formschluss Inspektionsaufgaben durchführen soll. Die Rumpfkineamtk ist durch eine kinematische Struktur mit dem Freiheitsgrad von $f = 3$ ausgestattet. Die Struktur besitzt zwei mechanische Greifer, welche als Zweibackengreifer ausgeführt sind (siehe Abbildung 84).

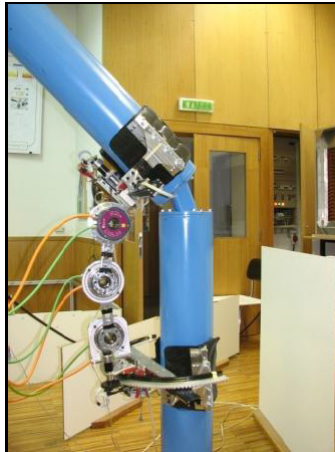


Abb. 84: Das System 3D-Climber ist ein Kletterroboter für die Inspektion von linearen Strukturen.

TAVAKOLI, M.; MARJOVI, A.; MARQUES, L.; ALMEIDA, A. T. de: 3D-Climber: A climbing robot for inspection of 3D human made structures. In: 2008 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems: IROS 2008; Nice, France. Piscataway, NJ: IEEE Service Center, 2008, 4130–4135

Eigenschaften

- | | |
|---------------------------|---------------------------------------|
| • Antriebe: | 6 DC-Motoren |
| • Masse des Systems: | $m = 42 \text{ kg}$ |
| • Größe: | $0,5 \times 0,6 \times 1 \text{ m}^3$ |
| • Klettergeschwindigkeit: | 1 m/min |
| • Adhäsionsprinzip: | mechanisch (Kraft- & Formschluss) |

Einschätzung

Das 3DClimber-System ist das einzige den RatNics vergleichbare System, was das Greifprinzip sowie das Einsatzfeld des Kletterroboters betrifft. Allerdings ist die Masse des Systems mit $m = 42$ kg deutlich höher als die Masse von „RatNic“ mit $m = 1,1$ kg. Der Grad der Autonomie ist gering, die Masse von 42 kg widerspricht einer Möglichkeit zur Autarkie, also zum Mitführen der benötigten Energie. Es zeigt sich, dass die Entwicklung von Kletterrobotern für Serviceaufgaben ein international zunehmend intensiv bearbeitetes Forschungsgebiet ist.

Kletterroboter mit der Kontakttechnologie „Trockene Adhäsion“

Verschiedene Kletterroboter klettern mit Hilfe von Haftpads, welche die Kontaktkraft zu zumeist Glas über trockene Adhäsion aufbauen. Allerdings können diese Systeme nur an vertikalen Substraten klettern, teilweise im leichten Überhang (siehe Abbildung 85). Ein Klettern im Überhang bei waagrechtem Substrat ist bis heute nicht umgesetzt.



Abb. 85: Adhäsionsbasierte Kletterroboter – diese können bis jetzt nur senkrechte Substrate (zumeist Glasscheiben) erklettern; Das linke Bild zeigt ein Mini-Whigs auf der vertikale Glasscheibe kletternd. Zusammenarbeit zwischen CAU, Kiel und CWRU, Cleveland (für Details siehe DALTORIO et al., 2005).

Einschätzung

Die Systeme können ausschließlich senkrechte Substrate beklettern. Die von der Gruppe Gorb mitentwickelte Haftstruktur hat eine deutlich erhöhte Adhäsionsspannung. So ist es möglich, einen im Überhang kletternden Roboter zu entwickeln. Diesen Wissensvorsprung auf unserer Seite sollte jetzt ausgenutzt werden, und die Machbarkeit im Experiment nachgewiesen werden. Das Klettern auf einem senkrechten Substrat scheint relativ schnell umsetzbar.

RISE V3

RISE V3 wurde im *Biodynamics Program* der DARPA (USA) entwickelt. Das Klettern an einer Holzstange erfolgt nach dem Prinzip des Stemmkletterns, wobei der Vorschub über die Beine (hochdynamische Beinbewegung) mit speziellen Krallenmechanismen realisiert wird (siehe Abbildung 86). **Die Maschine hat eine Masse von 5,4 kg, eine Länge von 70 cm, eine Schwanzlänge von 28 cm und erreicht eine beachtliche Klettergeschwindigkeit von ca. 20 cm/s.**

Als nächste Entwicklungsziele werden eine höhere Beweglichkeit (Klettern in verästelten Bäumen), eine höhere Geschwindigkeit sowie die Fortbewegung auf und der Übergang zu waagerechten Substraten definiert.



Abb. 86: RISE V3 beim Klettern auf einem hölzernen Substrat

WILE, G. D.; DALTARIO, K. A.; DILLER E. D.; PALMER, L. R.; GORB, S. N.; RITZMANN, R. E.; QUINN, R. D.: Screenbot: Walking Inverted Using Distributed Inward Gripping. In: Proceedings of 2008 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, 2008, 1513-1518

Einschätzung

RISE V3 ist für das Klettern an Baumstrukturen spezialisiert und erreicht hier beachtliche Leistungsparameter. Durch das Funktionsprinzip und die Masse dürfte allerdings der Energiebedarf recht hoch sein. „RatNic“ hat eine fünffach kleinere Masse und $\frac{1}{4}$ der Klettergeschwindigkeit. Der Vorteil der Leichtbaukonstruktion bei „RatNic“ sollte in Bezug auf eine erweiterte Kletterfähigkeit ausgebaut werden.

Fortschritt bei der Untersuchung arborealer Lokomotion

Die Ergebnisse der durchgeführten Studien haben unter anderem gezeigt, dass Charakteristika, die in Zusammenhang mit arborealer Lokomotion, Neigungslaufen und Klettern stehen und anfangs nur für Primaten beschrieben waren, auch bei anderen Säugetieren zu finden sind. In dieser Richtung haben während des Vorhabens auch in anderen Arbeitsgruppen Untersuchungen stattgefunden, die zeigen, dass auch Beuteltiere ähnliche Anpassungen aufweisen (z.B. LEMELIN & CARTMILL, 2010; SHAPIRO & YOUNG, 2010). Umgekehrt hat YOUNG (2009) gezeigt, dass sich Primaten, ähnlich wie die hier untersuchten Eichhörnchen, stabil in synchronen Gangarten arboreal fortbewegen können. Des Weiteren haben HANNA & SCHMITT (2011) festgestellt, dass bei Primaten ähnlicher Morphologie die zum Klettern verwendeten Mechanismen und die damit zusammenhängenden Parameter davon abhängen, welchen Anteil das Klettern am Fortbewegungsrepertoire der Tiere hat.

Zunehmend werden die Ergebnisse, die unter standardisierten Laborbedingungen erzielt worden sind, mit Daten aus dem Freiland verglichen.. Dabei hat sich gezeigt, dass sich Erkenntnisse zur Lokomotion von Primaten, die im Labor gewonnen wurden, im Freiland bestätigen lassen (s. z.B. D'AOUT & VEREECKE, 2011). Auch eine eigene Studie außerhalb des Projektes hat sich mit diesem Thema auseinandergesetzt (NYAKATURA & HEYMANN, 2010).

Außerdem deuten sich Entwicklungen neuer Versuchsmethoden an. Zum einen findet ein Übergang der Betrachtungen von schmalen und geneigten Substraten zu zusätzlich schwankenden (STEVENS, 2003) oder diskontinuierlichen (Higurashi et al., 2009) Substraten statt. Dadurch kann auf Grundlage der vorhandenen Daten ein weiterer Schritt in Richtung Imitation des natürlichen Habitats getan werden. Außerdem wurde in der Arbeitsgruppe von Lammers ein Drehmomentsensor entwickelt, mit dem es möglich ist, den Einfluss von Greifextremitäten bei der arborealen Lokomotion und dem Neigungslaufen und Klettern genauer zu untersuchen (s. LAMMERS & GAUTNER, 2008; LAMMERS, 2011).

Wie bereits erwähnt, wurde auch eine neue Methodik zur Darstellung der Fortbewegung und vor allem zur Messung der kinematischen Parameter entwickelt (Brainerd et al., 2010; Gatesy et al., 2010). Mit Hilfe des XROMM (x-ray reconstruction of moving morphology) kann eine realitätsgetreue Animation eines aus CT-Daten rekonstruierten Skeletts auf Grundlage der Röntgensequenzen erzeugt werden. Scientific roto-scoping, die markerlose Form des XROMM, wurde während des Vorhabens und wird während der Folgeprojekte wiederholt eingesetzt.

Biegert, J (1961): Volarhaut der Hände und Füße. In: Primatologia. Handbuch der Primatenkunde (eds. Hofer H, Schultz AH & Starck D). 2: 1-326. Karger, Basel.

Brainerd, E.L.; Baier, D.B.; Gatesy, S.M.; Hedrick, T.L.; Metzger, K.A.; Gilbert, S.L. & Crisco, J.J. (2010): X-Ray Reconstruction of Moving Morphology (XROMM): Precision, Accuracy and Applications in Comparative Biomechanics Research. J Exp Zool A Ecol Genet Physiol 313 (5): 262-279.

D'Aout K & Vereecke E (eds.) (2011): Primate Locomotion. Linking field and laboratory research. Springer.

Fremerey M (2010): Entwicklung eines passiven, adhäsionsbasierten Haftsystems für die Kletterrobotik. Diplomarbeit, TU Ilmenau.

Fremerey, M., Gorb, S., Heepe, L., Kasper, D., & Witte, H. (2011). MaTBot: A Magneto-adhesive Track robot for the inspection of artificial smooth substrates. AMAM, 11, 19-20.

Lemelin P & Catmill, M (2010). The effect of substrate size on the locomotion and gait patterns of the kinkajou (*Potos flavus*). J Exp Zool A Ecol Genet Physiol 313 (3): 157-168.

Gatesy, S.M.; Baier, D.B.; Jenkins, F.A.; & Dial, K.P. (2010): Scientific Rotoscoping: A Morphology-Based Method of 3-D Motion Analysis and Visualization. J Exp Zool A Ecol Genet Physiol 313 (5): 244-261.

Hanna, J.B.; Schmitt, D. (2011): Interpreting the Role of Climbing in Primate Locomotor Evolution: Are the Biomechanics of Climbing Influenced by Habitual Substrate Use and Anatomy? Int J Primatol 32: 430–444.

Higurashi Y., Hirasaki E. & Kumakura H (2009): Gaits of Japanese macaques (*Macaca fuscata*) on a horizontal ladder and arboreal stability. Am J Phys Anthropol 138 (4): 448-457.

Lammers AR (2011): Torque around the center of mass: dynamic stability during quadrupedal arboreal locomotion in the Siberian chipmunk (*Tamias sibiricus*). Zoology 114 (2): 95-103.

Lammers, AR & Gautner T (2008): Mechanics of torque generation during quadrupedal arboreal locomotion. J Biomech 41 (11): 2388-2395.

Nyakatura JA & Heymann EW (2010): Effects of support size and orientation on symmetric gaits in free-ranging tamarins of Amazonian Peru: implications for the functional significance of primate gait sequence patterns. *J Hum Evol* 58: 242–251.

Schweitzer M (2008): Algorithmen zur energieeffizienten Steuerung bionisch inspirierter Bewegungssysteme. Diplomarbeit, TU Ilmenau.

Shapiro L & Young J (2010): Is primate-like quadrupedalism necessary for fine-branch locomotion? A test using sugar gliders (*Petaurus breviceps*). *J Hum Evol* 58 (4): 309-319.

Stevens NJ (2003): The influence of substrate size, orientation and compliance upon prosimian arboreal quadrupedalism. Dissertation, State University of New York at Stony Brook.

Young J (2009): Substrate determines asymmetrical gait dynamics in marmosets (*Callithrix jacchus*) and squirrel monkeys (*Saimiri boliviensis*). *Am J Phys Anthropol* 138: 403-420.

Publikationen

Wissenschaftliche Publikationen

2007

Carl K, Schilling C & Witte H (2007): Der Reizleitungsapparat. Mechatronik F & M. Online-Publikation, Hanser Verlag

Creton C & Gorb S (2007) Sticky feet: from animals to materials. MRS Bulletin 32: 466-472

Daltorio KA, Gorb S, Peressadko A, Horschler AD, Wei TE, Ritzmann RE & Quinn RD (2007) Microstructured polymer adhesive feet for climbing robots. MRS Bulletin 32: 504-508

Fischer, M.S. & Witte, H.F. (2007): Legs evolved only at the end! Phil Trans. R. Soc. A. 365: 185-198

Fischer, M.S.; Lilje, K.E.; Schmidt, M. (200): Walking and climbing on small branches: convergent solutions in chameleons, marsupials, and primates. ICVM 8 abstracts: 40

Gladun D & Gorb S (2007) Insect walking techniques on thin stems. Arthropod-Plant Interactions. 1(2): 77-91

Gorb S & Varenberg M (2007) Mushroom-shaped geometry of contact elements in biological adhesive systems. J. Adhesion Sci. Technol. 21: 1175–1183

Gorb S (2007) Biological contact systems with enhanced adhesion: What can we learn from evolution? Proceedings of the STLE/ASME International Joint Tribology Conference IJTC2007 October 22-24, 2007, San Diego, California, USA, IJTC2007-44380, 3 pp.

Gorb S (2007) Visualisation of native surfaces by two-step molding. Microscopy Today. March 2007, 44-46

Gorb S, Sinha M, Peressadko A, Daltorio KA & Quinn RD (2007) Insects did it first: a micropatterned adhesive tape for robotic applications. *Bioinspiration & Biomimetics*. 2: 117–125

Nyakatura, J, Petrovitch, A & Fischer, M.S (2007) The functional morphology of the two-toed sloth's (*Choloepus didactylus*: Tardigrada) locomotor apparatus: A videoradiographic study. *J Morph* 268: 1112

Nyakatura, J, Klinge, A, Fischer, MS & Schmidt, M (2007) Locomotion on sloped arboreal substrates: a comparison of gait parameters in cotton-top tamarins and an arboreal australodelphid marsupial. *J Morph* 268: 1112

Stubenrauch M, Fischer M, Kremin C, Lilienthal K, Fröber U, Voges D, Witte H & Hoffmann M (2007) 'Black Silicon' - einstellbare Nanostrukturen mit neuen Applikationsfeldern, 3. Thüringer Grenz- und Oberflächentage, Erfurt, 2007

Varenberg M & Gorb S (2007) A beetle-inspired solution for underwater adhesion. *J. R. Soc. Interface*, doi:10.1098/rsif.2007.1171

Varenberg M & Gorb S (2007) Adhesion and friction of a biomimetic mushroom-shaped fibrillar microstructure. *Proceedings of the STLE/ASME International Joint Tribology Conference IJTC2007 October 22-24, 2007, San Diego, California, USA, IJTC2007-44193*, 2 pp.

Varenberg M & Gorb S. (2007) Shearing of fibrillar adhesive microstructure: friction and shear-related changes in pull-off force. *J. R. Soc. Interface* 4: 721–725

Vimieiro CBS, Andrada E, Lipfert S, Witte H & Pinotti M (2007) Calculation of Cardan Angles at the Hip Joint Using the ISB-Recommendation to Define the Joint Coordinate System. In: *19th International Congress of Mechanical Engineering, 2007, Brasilia-DF. Proceedings of The 19th International Congress of Mechanical Engineering. Rio de Janeiro- RJ : ABCM - Associação Brasileira de Engenharia e Ciências Mecânicas, 2007. Vol. 1, 1-6*

2008

Andrada E & Witte H (2008) 8th. World Congress on Computational Mechanics (WCCM8) 5th. European Congress on Computational Methods in Applied Sciences and Engineering (ECCOMAS 2008) June 30 – July 5, 2008 Venice, Italy

Daltorio KA, Wei TE, Horchler AD, Southard L, Wile GD, Quinn RD, Gorb S & Ritzmann RE (2008) Mini-Wegs™ climbs steep surfaces using insect-inspired attachment mechanisms. *Int. J. Robot. Res.*

Daltorio, KA, Witushynsky TC, Wile GD, Palmer LR, Malek AA, Ahmad MR, Southard L, Gorb S, Ritzmann RE & Quinn RD (2008) A body joint improves vertical to horizontal transitions of a wall-climbing robot. ICRA 2008: IEEE International Conference on Robotics and Automation, 19-23 May 2008, pp. 3046 - 3051. DOI: 10.1109/ROBOT.2008.4543673

Eimüller T, Guttman P, Gorb S (2008) Terminal contact elements of insect attachment devices studied by transmission X-ray microscopy. *J. Exp. Biol.* 211:1958-1963

Frantsevich L, Ji A, Dai Z, Wang J, Frantsevich L & Gorb S (2008) Adhesive properties of the arolium of a lantern-fly, *Lycorma delicatula* (Auchenorrhyncha, Fulgoridae). *J. Insect Physiol.* 54: 818-827

Gorb SN (2008) Biological attachment devices: exploring nature's diversity for biomimetics. *Phil. Trans. R. Soc. A* 366: 1557-1574

Gorb SN (2008) Smooth attachment devices in insects: functional morphology and biomechanics. *Adv. Ins. Physiol.* 34: 81-115

Gorb SN, Voigt D (2008): Oberflächenbionik. In: Stiftung Brandenburger Tor (ed.) Prototypen. Bionik und der Blick auf die Natur. Ausstellungskatalog, Berlin: 39-40

Gorb S, Voigt D & Peisker H (2008) Insect epicuticular grease visualised by scanning probe microscopy. *Microscopy Today* 16(3): 42-45

Mämpel J, Karguth A, Gorb S, Fischer MS & Witte H (2008) 4th International Symposium on Adaptive Motion of Animals and Machines (AMAM), Case Western Reserve University Cleveland, Ohio, USA - June 1-6 2008

Mämpel J, Andrada E, Witte H, Trommer C, Karguth A, Fischer MS, Voigt D & Gorb S: Inspirat - Towards a biologically inspired climbing robot for the inspection of linear structures. In: Advances in Mobile Robotics - Proceedings of the Eleventh International Conference on Climbing and Walking Robots and the Support Technologies for Mobile Machines (2008), 206 - 213

Nyakatura, J.A.; Fischer, M.S.; Schmidt, M. (2007): Gait parameter adjustments of cotton-top tamarins (*Saguinus oedipus*, Callitrichidae) to locomotion on inclined arboreal substrates. Amer. J. Phys. Anthropol. 135, 13-26

Perez Goodwyn P, De Souza E, Fujisaki K & Gorb S (2008) Moulding technique demonstrates the contribution of surface geometry to the super-hydrophobic properties of the surface of a water strider. Acta Biomater. 4:766-770

Schmidt, M.; Lilje, K.E.; Fischer, M.S.: **Walking and climbing on small branches: convergent solutions in chameleons, marsupials, and primates.** Amer. J. Phys. Anthropol. 135, 186

Varenberg M & Gorb S (2008) Close-up of mushroom-shaped fibrillar adhesive microstructure: contact element behaviour. Proc. 9th Biennial ASME Conference Engin. Syst. Des. Anal., ESDA2008-59095

Voigt D, Peisker H & Gorb S (2008). **Visualization of epicuticular grease on the covering wings in the colorado potato beetle: A Scanning Probe Approach.** In: B. Bhushan & H. Fuchs (eds.) Applied Scanning Probe Methods XIII. Biomimetics and Industrial Applications. Heidelberg, Springer-Verlag: 1-16

Voigt D & Gorb S (2008): An insect trap as habitat: cohesion-failure mechanism prevents adhesion of *Pameridea roridulae* bugs to the sticky surface of the plant *Roridula gorgonias*. J. Exp. Biol. 211: 2647-2657

Voigt D, Schuppert JM, Dattinger S & Gorb S (2008) Sexual dimorphism in the attachment ability of the colorado potato beetle *Leptinotarsa decemlineata* (Coleoptera, Chrysomelidae). J. Insect Physiol. 54: 765-776

Voigt D, Schuppert J, Dattinger S & Gorb S (2008): Sexualdimorphismus der Haftfähigkeit an rauen Oberflächen bei *Leptinotarsa decemlineata* Say (Coleoptera, Chrysomelidae). Mitt. Dtsch. Ges. Allg. Angew. Ent., 16: 431-434

Wile GD, Daltorio KA, Diller ED, Palmer LR, Gorb S, Ritzmann RE & Quinn RD (2008) Conference on Intelligent Robots and Systems 22-26 Screenbot: Walking inverted using distributed inward gripping. IROS 2008: IEEE/RSJ International Sept. 2008, Pages: 1513 – 1518. DOI: 10.1109/IROS.2008.4651045

Wile, G.D., Daltorio, K.A., Palmer, L.R., Witushynsky, T.C., Southard, L., Ahmad, M.R., Malek, A.A., Gorb, S.N., Boxerbaum, A.S., Ritzmann, R.E., Quinn, R.D. (2008). Making orthogonal transitions with climbing mini-whegs™. ICRA 2008: IEEE International Conference on Robotics and Automation, 19-23 May 2008, Pages:1775 – 1776. DOI: 10.1109/ROBOT.2008.4543461

2009

Andrada E & Witte H (2009): Walking machines - walking. In: Behn, Carsten, Zeidis, Igor, Zimmermann, Klaus (Hg.): Mechanics of Terrestrial Locomotion. With a Focus on Non-pedal Motion Systems. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag Berlin Heidelberg (Springer-11647 /Dig. Serial]), 125-139, 156-159

Andrada E, Schmidt A, Koehring S, Mämpel J, Fischer MS & Witte H (2009): The Effects of Substrate Inclination on Torque Patterns in Rats. Proc 3rd International Symposium on Mobiligence

Karguth A (2009): Raupi - Robnics – Bionisch inspirierte Robotik. In: Kesel, Antonia B. (Hg.): Bionik: Patente aus der Natur. 4. Bionik-Kongress, Hochschule Bremen, 7. - 8. November 2008, S. 160–165

Mämpel J (2009): Raupi - ein modularer, biologisch inspirierter Kletterroboter. In: Kesel, Antonia B. (Hg.): Bionik: Patente aus der Natur. 4. Bionik-Kongress, Hochschule Bremen, 7. - 8. November 2008, S. 270–276

Mämpel J, Andrada E, Köhring S, Krause C, Schmidt A, Fischer MS, Witte H (2009): Zur Technischen Biologie des Kletterns. In: Kesel, Antonia B. (Hg.): Bionik: Patente aus der Natur. 4. Bionik-Kongress, Hochschule Bremen, 7. - 8. November 2008, Tagungsbeiträge. Bremen: Bionik-Innovations-Centrum, 196–206

Mämpel J, Eisold R, Kempf W, Schilling C & Witte H (2009): A Modular Concept for a Biologically Inspired Robot. In: Kozłowski, Krzysztof R. (Hg.): Robot motion and control 2009. [Seventh International Workshop on Robot Motion and Control (RoMoCo '09), Czerniejewo, Poland, June 1 to 3, 2009 , selected papers]. Berlin: Springer (Lecture notes in control and information sciences, 396), 391–399

Mämpel J, Koch T, Köhring S, Obermaier A & Witte H (2009): Concept of a modular climbing robot. In: IEEE Symposium on Industrial Electronics & Applications (2), 789–794

2010

Al Bitar L, Voigt D, Zebitz CPW, Gorb S (2010): Attachment ability of the codling moth *Cydia pomonella* L. to rough substrates. J. Insect Physiol. 56: 1966-1972

Andrada E, Mämpel J, Schmidt A, Fischer MS, Karguth A & Witte H (2010): Biomechanical analyses of rat locomotion during walking and climbing as a base for the design and construction of climbing robots. In: Brebbia CA, Carpi A (Eds.): Design and nature V. Comparing design in nature with science and engineering. Southampton: WIT (WIT transactions on ecology and the environment)

Bauer G, Klein MC, Gorb S, Speck T, Voigt D & Gallenmüller F (2010): Always on the bright side: the climbing mechanism of *Galium aparine*. Proceedings of the Royal Society B 00: 1–7

Fischer MS, Krause C & Lilje KE (2010): Evolution of chameleon locomotion, or how to become arboreal as a reptile. Zoology 113: 67-74

Fischheiter L, Mämpel J & Witte H (2010): Towards compliant drives for modular climbing robot. In: Emerging trends in mobile robotics. Proceedings of the 13th International Conference on Climbing and Walking Robotics and the Support Technologies for Mobile Machines CLAWAR, Nagoya, Japan (31.08-03.09.2010), 989-996

Fremerey M, Mämpel J, Witte H & Gorb S (2010): Towards an adhesive gripping module for handling tasks and small-sized climbing robot. In: Emerging trends in mobile robotics. Proceedings of the 13th International Conference on Climbing and Walking Robotics and the Support Technologies for Mobile Machines (CLAWAR), Nagoya, Japan, 31.8-3.9.2010, 133-140

Fremerey M, Gorb S, Mämpel J & Witte H (2010): Biologically inspired adhesive structures for handling tasks and climbing robots", in: 5th Bionik-Kongress - "Patente aus der Natur", Bremen, Germany (22./23.10.2010)

Gorb S (2010): Biological and biologically inspired attachment systems. In: Bhushan B (Ed.) Springer Handbook of Nanotechnology ISBN 978-3-642-02524-2, Hardcover, Springer Verlag: Heidelberg, 1525-1551

Leipelt KG, Suhling F & Gorb S (2010) Ontogenetic shifts in functional morphology of dragonfly legs (Odonata: Anisoptera). *Zoology* 113: 317–325

Mämpel J (2010): Definition und exemplarische Realisation eines modularen Systems für die Kletterrobotik. *Berichte aus der Biomechatronik* 5 (Ed. Witte H), Universitätsverlag Ilmenau

Mämpel J, Andrada E, Trommer C, Karguth A & Witte H (2010): Design of a climbing robot based on biomechanical analyses. In: 13th International Conference on Climbing and Walking Robots (CLAWAR 2010). Nagoya, Japan, 2010

Mämpel J, Andrada E, Witte H, Trommer C, Schweitzer M, Karguth A, Schmidt A & Fischer MS (2010): Mechanical design of a climbing robot based on biomechanical analyses. *Emerging trends in mobile robotics. Proceedings of the 13th International Conference on Climbing and Walking Robotics and the Support Technologies for Mobile Machines (CLAWAR)*, Nagoya, Japan, 367-374

Mämpel J, Köhring S, Schilling C, Witte H (2010): Using Different Adhesion Technologies in Modular Robot for Climbing. In: *Proceedings of 41st International Symposium on Robotics (ISR 2010)*. München, 2010

Nyakatura JA & Fischer MS: Three-dimensional kinematic analysis of the pectoral girdle during upside-down locomotion of two-toed sloths (*Choloepus didactylus*, Linné 1758). *Frontiers Zool* 7 (21): 1-16

Nyakatura JA & Fischer MS: Functional morphology and three-dimensional kinematics of the thoraco-lumbar region of the spine of the two-toed sloth. *J Exp Biol* 213: 4278-4290

Nyakatura JA & Heymann (2010). Effects of support size and orientation on symmetric gaits in free-ranging tamarins of Amazonian Peru: implications for the functional significance of primate gait sequence patterns. *J Hum Evol* 58: 242–251

Nyakatura JA, Petrovitch A & Fischer MS: Limb kinematics during locomotion in the two-toed sloth (*Choloepus didactylus*, Xenarthra) and its implications for the evolution of the sloth locomotor apparatus. *Zoology* 113: 221-234

Persson BNJ, Kovalev A, Wasem M, Gnecco E & Gorb S (2010) Surface roughness of peeled adhesive tape: A mystery? *EPL*, 92 (2010) 46001

Roth-Nebelsick A, Voigt D & Gorb S (2010) Cryo-scanning electron microscopy studies of pits in *Pinus wallichiana* and *Mallotus japonicus*. *IAWA Journal* 31: 257-267

Schmidt A & Fischer MS: Arboreal locomotion in rats – the challenge of maintaining stability. *J Exp Biol* 213: 3615-3624

Voigt, D & Gorb S (2010): Beating the Lotus effect or how to wet unwettable surfaces. Tagungsbeiträge zum 5. Bionik-Kongress in Bremen “Bionik: Patente aus der Natur”, 22.-23. Oktober 2010: 373-377

Voigt D & Gorb S (2010): Desiccation resistance of adhesive secretion in the protocarnivorous plant *Roridula gorgonias* as an adaptation to periodically dry environment. *Planta* 232: 1511-1515

Voigt D & Gorb S (2010): Egg attachment of the asparagus beetle *Crioceris asparagi* to the crystalline waxy surface of *Asparagus officinalis*. *Proc. R. Soc. B*: 277: 895-903

Voigt D & Gorb S (2010): Locomotion in a sticky terrain. *Arthropod-Plant Interactions*. DOI:10.1007/s11829-010-9088-1.

2011

Nyakatura JA & Fischer MS (2011): Functional morphology of the muscular sling at the pectoral girdle in tree sloths: convergent morphological solutions to new functional demands? J Anat 216:360-374

Schmidt A (2011): Functional differentiation of trailing and leading forelimbs during locomotion on the ground and on a horizontal branch in the European red squirrel (*Sciurus vulgaris*, Rodentia). Zoology 114: 155-164

Schmidt A & Fischer MS (2011): The kinematic consequences of locomotion on sloped arboreal substrates in a generalized (*Rattus norvegicus*) and a specialized (*Sciurus vulgaris*) rodent. J Exp Biol 214: 2544-2559.

Schmidt M. (2011): Locomotion and postural behaviour. Advances in Science & Research 5: 23-39

Voigt, D & Gorb, S (2011): Attachment ability of sawfly larvae to smooth surfaces. Arthropod Structure & Development, Submitted.

Voigt, D., Hosoda, N., Schuppert, J. M., Gorb, S. N. (2011): On the laboratory rearing of green dock leaf beetles *Gastrophysa viridula* De Geer (Coleoptera, Chrysomelidae). Insect Science 18: 379-384

2012

Carl K, Hild W, Mämpel J, Schilling C, Uhlig R & Witte H (2012): Characterisation of static properties of rat's whisker system. IEEE Sensors (Ausgabe Februar 2012)

Nyakatura JA (2012): The convergent evolution of suspensory posture and locomotion in tree-sloths. J Mamm Evol. 19 (3): 225-234

Voges D, Carl K, Klauer G, Uhlig R, Schilling C, Behn C & Witte H (2012): Structural characterisation of the whisker system of the rat, IEEE Sensors (Ausgabe Februar 2012)

2013

Andrada, E, Mämpel, J, Schmidt, A, Fischer, MS, Karguth, A, Witte, H (in press): From biomechanics of rats' inclined locomotion to a climbing robot. *Int. Journal of Design & Nature and Ecodynamics* 8(3): 191-212.

Krause, C, Fischer, MS (2013): Biodynamics of climbing: effects of substrate orientation on the locomotion of a highly arboreal lizard (*Chamaeleo calyptratus*). *J. exp. Biol.* 216, 1448-1457

Nyakatura, JA, Andrada, E. (2013). A mechanical link model of two-toed sloths: no pendular mechanics during suspensory locomotion. *Acta Theriol* 58(1), 83-93.

In Vorbereitung/ im Druck

Hesse B, Nyakatura JA, Fischer MS & Schmidt M: Discontinuities in locomotor parameters discriminate quadrupedal incline locomotion from climbing in cotton-top tamarins.

Hesse B, Nyakatura JA, Fischer MS & Schmidt M: 3D kinematics and kinetics of climbing using prehensile feet and claws.

Krause C & Fischer MS: 3D motion research: the quantification of the degree of abduction in the veiled chameleon (*Chamaeleo calyptratus*) by considering rotational and undulatory spine movements.

Schmidt M & Fischer MS.: Locomotion on sloped substrates – various strategies and implications for the definition of climbing

Fernsehbeiträge

2007

- MDR: MDR-Aktuell ausgestrahlt am 13.06.2007
- 3Sat/ WDR: „Nano“ ausgestrahlt am 11.07.2007
- ARD: „W Wie Wissen“ ausgestrahlt am 20.10.2007
- RTL: „Nachtjournal“ ausgestrahlt am 15.11.2007
- Discovery Channel Kanada: Daily Planet Ausstrahlung Dez. 2007
- Jena TV: JenaJournal ausgestrahlt am 13.06.2007
- SWR2 Wissen "Wunder auf acht Beinen-Spinnentiere inspirieren die Forschung"
- Prometheus – Das Wissenschaftsfernsehen für Baden-Württemberg, Themen, „Tierisch gut – Lernen von Gecko und Co.“
- Phoenix „Frauenpower“

2008

- ZDF: „Klar - Wissen ist gut“ (2008)
- SWR Fernsehen: „Total phänomenal“ (29.05.2008)
- Bionik im Discovery Channel, USA
- AUDI-TV, Bionik, InspiRat-Projekt mit RatNic, 2008, <http://tv.audi.de/video/1180#/08>
- 3Sat/SWR nano „Antihafwanzen“ (9.10.2008)

2009

- Sat1-Sendung Planetopia „Genialer Gecko-Effekt – Warum manche Tiere senkrecht die Wand hochlaufen“ (8.11.2009)
- Fernsehsendung „Die große Show der Naturwunder“ ARD 2.7.2009
- Fernsehaufzeichnung für ZDF-Sendung „Abenteuer Wissen“ am 12.8.2009
- Fernsehbeitrag „Genialer Gecko-Effekt – Warum manche Tiere senkrecht die Wand hoch laufen“ Sat1-Sendung Planetopia am 8.11.2009

2010

- Invisible Worlds (BBC, UK)
- SF1, Magazin „Einstein“, Bionik, InspiRat-Projekt, RatNic, Sendetermin: 16.12.2010, (Mediathek: <http://www.videoportal.sf.tv/video?id=60f98f9b-17a5-4624-abb0-764d87a389e2>)
- ZDF, Magazin „Abenteuer Wissen“, Bionik, InspiRat-Projekt, RatNic, Sendetermin: 24.3.2010, Ratte <http://www.zdf.de/ZDFmediathek/hauptnavigation/startseite#/beitrag/video/1002710/Vorbild->

2013

- MDR: "einfach genial"

Rundfunk

2011

- Die Durchblicker (Radio: WDR, SW, NDR, BR, MDR)
- Quarks & Co (WDR)
- Thüringen Journal (MDR)

Zeitschriftenartikel außerhalb von Fachzeitschriften

2007

- DPA, Financial Times, FAZ, Die Zeit, Robotik, Biologie in unserer Zeit
- National Geographic Deutschland, 5/2008 (Text und Foto)
- viele Beiträge in regionalen Zeitungen

2008

Der Spiegel, 4/2008, Senkrecht im Toilettenrohr, von Frank Thadeusz,
<http://www.spiegel.de/spiegel/print/d-55508053.html>

Anonym (2008) Allemaal vliegjes. InterConnect, 3/2008: 27-28

Anonym (2008) Symbiosen: Klebrige Sache. Bild der Wissenschaft 11/2008: 13

Anonym (2008) Tape suger sig fast som edderkopper. Illustreret Videnskab, 9/2008: 18

Gorb, S. N., Voigt, D. (2008) Oberflächenbionik. In: Stiftung Brandenburger Tor (ed.) Prototypen. Bionik und der Blick auf die Natur. Ausstellungskatalog, Berlin: 39-40

Gormsen, A. J. (2008) Insektfødder inspirerer forskere til ny slags tape.
<http://ing.dk/artikel/84624?highlight=stanislav+gorb>

Guillot, A., Meyer, J.-A. (2008) Comment mieux adhérer. In: La bionique. Quand la science imite la nature. Dunod, Paris (ISBN 978-2-10-050635-4): 31-35

Kalinke, M. (2008) Haarspalter. RPS Wissen

Latusseck, R. (2008) Fressen wo andere sterben. Die Welt, 11.08.2008.

Läubli, M. (2008) Pflanze fangt für Wanze. Züricher Tagesanzeiger, 14.8.2008: 26

Michael Varenberg and Stanislav Gorb (2008) What beetles can teach us about adhesion. BioInspired! Vol. 6 (3): 6-7

Mild, M. (2008) Wanze auf der Pflanze als Forschungsobjekt. Südwestumschau, 10.11.2008

Wandtner, R. (2008) Wanze in schlüpfrigem Kleid. FAZ, Nr. 188 (13.8.2008): 2.

Weitlaner, W. (2008) Anti-Haft-Wanze trotz klebriger Pflanze Natur liefert Vorbild für Haft- und Antihaftschichten. www.presstext.at

2009

Strassmann, B. (2009) Kleben wie der Gecko – Komplexe Sachtexte verstehen. Duo Deutsch A9. Sprach- und Lesebuch. Oldenburg, bsv, Cornelsen Verlag, Portenhauser. 220-223

2010

Gorb, S. N., Voigt, D. (2010): Funktionale biologische Oberflächen als Vorbilder für die Technik. Performance, Doppelausgabe 2.2009|1.2010: 68-77

Gorb, S. N., Voigt, D. (2010): Winzige Strukturen mit großer Wirkung. In: TECHNOSEUM – Landesmuseum für Technik und Arbeit in Mannheim- (Hrsg.) Nano! – Nutzen und Visionen einer neuen Technologie. Katalog zur gleichnamigen Sonderausstellung: 50-57

Teilnahme an Konferenzen und anderen Veranstaltungen

Konferenzen

2007

- 3. Thüringer Grenz- und Oberflächentage 19/20. September, Erfurt
- 100. Jahrestagung der Deutschen Zoologischen Gesellschaft (DZG), Köln, Deutschland. (2 Vorträge)
- 2nd Congress of the European Federation for Primatology (EFP), Prag, Tschechische Republik. (Poster, Vortrag)
- 8th International Conference on Vertebrate Morphology (ICVM), Paris, Frankreich. (Poster)
- STLE/ASME International Joint Tribology Conference IJTC2007 October 22-24, 2007, San Diego, California, USA (2 Vorträge)
- Annual Meeting of The Society for Experimental Biology, Glasgow, UK (Vortrag)
- Bioinspired nanotechnologies for smarter products, London, UK. (Vortrag)
- 30th Annual Meeting of the Adhesion Society Inc., Tampa, Florida (Vortrag)
- Entomologentagung 2007, Innsbruck, Österreich (Vortrag)
- Annual main meeting of the Society for Experimental Biology (SEB), Glasgow, UK (2 Vorträge, 2 Poster)
- 5th Worldwide Dragonfly Association International Congress of Odonatology, Swakopmund, Namibia (Eröffnungsvortrag)

2008

- Tagung der Deutschen Zoologischen Gesellschaft in Jena, Deutschland vom 19.09.2008 – 22.09.2008 (5 Posterbeiträge)
- 53th Internationales Wissenschaftliches Kolloquium in Ilmenau, Deutschland, September 2008 (3 Vorträge, 1 Poster)

- 11th International Conference on Climbing and Walking Robots and the Support Technologies for Mobile Machines, Coimbra, Portugal, September 2008, (1 Vortrag)
- Bionik-Kongress „Patente aus der Natur“, Bremen, Deutschland, Dezember 2008 (3 Vorträge, 5 Poster)
- Bionik Symposium bei der Stiftung Brandenburger Tor, Berlin, 13.06.2008 (Vortrag+ Teilnahme bei der Ausstellung).
- BIONA Statusseminar, Bonn 27.-28.11.2008 (2 Vorträge)
- XXII Congress of the International Primatological Society, Edinburgh, UK (2 Vorträge)
- 77. Annual Meeting of the American Association of Physical Anthropologists (AAPA), Columbus, USA (Vortrag)
- 4th International Symposium on Adaptive Motion in Animals and Machines, Cleveland, USA. (2 Vorträge)
- Bionik-Wirtschaftsforum, 8.-9. April 2008, Osnabrück (Vortrag)
- Denkendorfer Bionik-Kolloquium „Bio-inspired textile materials), ITV Denkendorf (Vortrag)
- Cimtec 2008, 3rd International Conference Smart Materials, Structures and Systems, Acireale, Sicily, Italy, June 8-13, 2008 (2 Vorträge und Programmkomitee/Sektionsorganisation)
- 10th Annual meeting of the Gesellschaft für Biologische Systematik and the 18th International Symposium “Biodiversity and Evolutionary Biology” of the German Botanical Society, Göttingen, Germany (Vortrag)
- 27th Jahrestagung der Gesellschaft deutschsprachiger Odonatologen (GdO e.V.), Potsdam, March 7-9, 2008 (Vortrag)
- Adhesion Conference. March 25-28, 2008, Sevilla, Spanien (2 Vorträge)
- Symposium on Biomaterials Processing. Januar 21-25, 2008, Nagoya, Japan. (Vortrag)
- AIF Forum Industrielle Gemeinschaftsforschung für den Mittelstand, Dresden, 26.06.2008 (Vortrag)
- 9th Biennial ASME Conference on Engineering Systems Design and Analysis ESDA08, 7th-9th July 2008, Haifa, Israel (3 Vorträge)
- Alpsbacher Technologieforum, Alpbach, Österreich, 21-23.08.2008 (Vortrag).

- Fachtagung „Bionik – an der Schnittstelle zwischen Biologie und Technik“, 24.-25.09.2008, Wien, Austria (Vortrag)
- IROS/IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, Sept. 22-26, 2008 (Vortrag)

2009

- 4th International Conference on Autonomous Robots and Agents, Neuseeland, 10.-12.2.2009 (1 Vortrag)
- 6. Jahrestagung der Deutschen Gesellschaft für Biomechanik (DGfB) in Münster, Deutschland vom 14.05.-16.05.2009 (Teilnahme am Biomechanik-Nachwuchsworkshop, 1 Vortrag und 1 Poster)
- VDE Mechatronik Tagung 13.5.2009 (Hauptvortrag)
- 7th International Workshop on Robot Motion and Control, Polen, 01.-03. Juni, 2009 (Vortrag)
- 3rd International Symposium on Mobiligence, Awaji, Japan (2009) – (Plenary talk, Vorträge, Poster)
- „1. bionisches symbiosium“ des bionic engineering network e.V. (BEN), Saarbrücken
- 2. Graduiertentreffen der Fachgruppe Morphologie der DZG, Greifswald, Deutschland. (Poster)
- 11. Tagung der Gesellschaft für Primatologie (GfP), Hannover, Deutschland. (Vortrag)
- 102. Jahrestagung der Deutschen Zoologischen Gesellschaft (DZG), Regensburg, Deutschland. (Vortrag)
- 5th International Colloquium on Arboreal Tree Squirrels, Kamloops, Canada. (Vortrag)
- XVII National Congress of the Italian Society of Mechanics and Applied Theory, September 14-17, 2009, Ancona, Italy (Vortrag)
- Micro-Tribology '09. September 20-24, 2009, Milowka, Poland (Warsaw University of Technology, Institute of Micromechanics and Photonics) (2 Vorträge)
- German-Russian Workshop “Contact Mechanics and Friction”, October 5-8, 2009, Berlin (Vortrag)

- Joint ICTP/FANAS Conference Trends in Nanotribology, 19-24 October 2009, ICTP Trieste, Italy (Vortrag, Poster)
- 6th Plant Biomechanics Conference in Cayenne, Französisch Guiana (16.-21.11.2009, 3 Vorträge)

2010

- Leichtbaurobotik für Service- und Assistenzaufgaben, Workshop "Mechatronics and Control of Compliant Drives and Mechanisms, 25 bis 26-2010, Universität Bielefeld
- Lightweight Robotics – RobNics - Robots by Nature Inspired Technologies. Workshop adidas-innovation team, 7. bis 8.5.2010, Ilmenau
- Society for Experimental Biology, Annual Main Meeting 2010, Prague (Czech Republic), 30.06.2010 - 03.07.2010 (3 Vorträge)
- 6th Nanoscience and Nanotechnology Conference, Izmir (Türkei), 15.06.2010-18.06.2010 (Vortrag und Poster).
- 29. GdO-Tagung in Rothenburg ob der Tauber, 19.03.2010 - 21.03.2010 (Vortrag)
- 13th International Conference on Climbing and Walking Robots (CLAWAR 2010). Nagoya, Japan, 2010 (2 Vorträge)
- 41st International Symposium on Robotics (ISR 2010). München, 2010 (3 Vorträge)
- 13th International Conference on Climbing and Walking Robotics and the Support Technologies for Mobile Machines (CLAWAR), Nagoya, Japan (3 Vorträge)
- Bionik-Kongress - „Patente aus der Natur“, Bremen, Germany, 22./23.10.2010 (2 Vorträge, 6 Poster)
- 9th International Conference on Vertebrate Morphology (ICVM), Punta del Este, Uruguay. (3 Vorträge)
- Society for Experimental Biology, Annual Main Meeting 2010, Prague (Czech Republic), 30.06.2010 - 03.07.2010 (3 Vorträge)
- 6th Nanoscience and Nanotechnology Conference, Izmir (Türkei), 15.06.2010-18.06.2010 (Vortrag und Poster)

- 29. GdO-Tagung in Rothenburg ob der Tauber, 19.03.2010 - 21.03.2010 (Vortrag).
- Gordon Conference Tribology, Colby College, Waterville, ME, USA (27.06 – 2.07.2010, 1 Vortrag)
- Europäischer Entomologenkongress, Budapest, Ungarn (22.-27.08.2010, Vortrag)
- Deutsche Pflanzenschutztagung, Berlin (06.-09.09.2010, Vortrag)
- 5. Bionikkongress, Bremen (22.-23.10.2010, 2 Vorträge, 4 Poster)
- Kick-off Scientific Workshop Cost Action TD0906 “Biological Adhesives”, Wien, Österreich (2-5.11.2010, Vortrag)
- 58. Jahrestagung der Entomologischen Gesellschaft Amerikas, San Diego, USA (11.-16.12.2010, Vortrag, Poster)

2011

- 4. Graduiertentreffen der Fachgruppe Morphologie der DZG, München, Deutschland. (Vortrag)
- 104. Jahrestagung der Deutschen Zoologischen Gesellschaft (DZG), Saarbrücken, Deutschland. (Poster, Vortrag)
- Annual Meeting of The Society for Integrative and Comparative Biology (SICB), Salt Lake City, USA. (Vortrag)
- International Industrial Convention on Biomimetics, Berlin (2 Vorträge, Demonstration Fa. Binder)
- DgaaE-Entomologentagung (21.-24.03.2011, Vortrag, Poster)
- 2nd Scientific Workshop Cost Action TD0906 “Biological Adhesives”, Mons, Belgien (18.-20.05.2011, Vortrag)

Eingeladene Vorträge

2007

- Gorb, S. N., Degussa-Workshop "Bionik"
- Voigt, D., Wörlitzer Workshop Funktionelle Schichten „Adhäsion und Oberflächenfunktionalisierung“
- Gorb, S. N., Fakultät Biologie, Universität München
- Gorb, S. N., Fakultät für Technik, FH Pforzheim
- Gorb, S. N., Workshop HILTI Corporation, Materials & Mechanics, New Business & Technology (Schaan, Liechtenstein) an der Universität Freiburg
- Gorb, S. N., Workshop BioEngineering, BitZ Darmstadt
- Gorb, S. N., Explore Science, Naturwissenschaftliche Erlebnistage Mannheim

2008

- Fachtagung „Bionik – an der Schnittstelle zwischen Biologie und Technik“, 24.-25.09.2008, Wien, Austria (Vortrag)
- Gorb, S. N. (Januar 2008) Universität Stuttgart (Bionik-Vorlesung)
- Gorb, S. N. (Januar 2008) European Space Agency, Niederlande (Bionikvortrag)
- Gorb, S. N. (März 2008) FH Pfillach, Kärnten, Österreich (Bionikvortrag)
- Gorb, S. N. (April 2008) CRTD, Zentrum für regenerative Therapien, Dresden (Vortrag)
- Gorb, S. N. (Juni 2008) FH Pforzheim (Bionikvortrag)
- Gorb, S. N. (Juni 2008) AIF Funktionelle Oberflächen, Dresden (Vortrag)
- Voigt, D. „Funktionelle biologische Oberflächen und Biomimetik“ im Rahmen der Ringvorlesung Bionik, Universität Stuttgart (Vortrag)

2009

- Voigt, D., Experimentalvortrag im Rahmen der Ringvorlesung Bionik an der FH Pforzheim
- Gorb, S. N. Naturwissenschaftlicher Verein Schleswig-Holstein GKSS Teltow der
- Gorb, S. N. Helmholtz-Gesellschaft, Schwerpunkt Polymeroberflächen
- Gorb, S. N. Workshop des Graduiertenkolleg der Technischen Universität Dresden
- Gorb, S. N. (29.9.-2.10.2009) Willi-Hennig-Symposium an der Universität Hohenheim, Stuttgart
- Voigt, D. (1.10.2009) International Symposium on Engineering Neo-Bio-mimetics in Tokyo, Japan
- Voigt, D. (3.10.2009) Satellite Symposium on Biomimetic Surface Engineering in Sapporo, Japan
- Gorb, S. N. (15.10.2009) Darwin reloaded-Evolution Heute. Vortragsreihe zum Darwin-Jahr an der Universität Hohenheim, Stuttgart
- Gorb, S. N. (27.10.2009) Interuniversity Micro Electronics Center (IMEC), Leuven, Belgien
- Gorb, S. N. (3.11.2009) Lübecker Werkstoffmesse, IHK Lübeck
- Gorb, S. N. (26.11.2009) Fa Bühler, Uzwil, Schweiz
- Gorb, S. N. (2-3.12.2009) University of Cardiff, Cardiff, UK
- Gorb, S. N. (5.12.2009) Saturday Morning Physics, Veranstaltung für Schulklassen, Kiel

2010

- Witte, H. (17.06.2010) TU München, Ringvorlesung Bionik
- Fröber, U. (19.11.-02.12.2010): Biomechatronics – engineering aspects of bionic, Inspired by Minds and Nature – new ways to intensive creativity (Deutsch-Brasilianisches Jahr der Wissenschaft, Technologie und Innovation 2010/11), Universidade Federal de Santa Catarina, Brazil
- Karguth, A.: Lightweight Robotics – RobNics - Robots by Nature Inspired Technologies. Workshop adidas-innovation team, 7. bis 8.5.2010, Ilmenau
- Witte, H., Schilling, C. (12.11.2010): Biomechatronik, Sächsische Akademie der Wissenschaften, Leipzig, Germany
- Witte, H. & Schilling, C. (2.11.2010): Biomechatronik, IHK Ostwestfalen, Bielefeld, Germany
- Witte, H. (09.12.2010): Biomechatronik – das Original, Verleihung 'Preis für Konstruktion und Mechatronik Heinz-Dieter Schunk', FH Heilbronn, Germany
- Karguth, A.: Leichtbaurobotik für Service- und Assistenzaufgaben, Workshop "Mechatronics and Control of Compliant Drives and Mechanisms", 25 bis 26-2-2010, Universität Bielefeld
- Voigt, D. (18.01.2010) „Biologische Oberflächen und Bionik“ i. R. d. Ringvorlesung Bionik an der Universität Stuttgart
- Gorb, S. N. (30.04.2010) Endess+Hauser, Vortrag zur Einweihung des neuen Werks in Berlin
- Gorb, S. N. (24.06.2010) TU München, Ringvorlesung Bionik
- Voigt, D. (26.10.2010) „Pflanzen-Insekten-Interaktionen: biomechanische Aspekte“ i. R. d. Kolloquiums der FÖAG, CAU Kiel

2011

Ijspeert, A.J. & Karguth, A.: Bioinspired robotics – Research and commercial applications. Biomimetics - International Industrial Convention on Biomimetics, 16. and 17.03.2011, Berlin, Session 5: Automation, Robotics and Sensor Technology

Witte, H., Mämpel, J., Andrada, E., Fischer, M.S., Schmidt, A., Schmidt, M., Karguth, A., Trommer, C. & Schweitzer M.: RatNic - Technology and Biology. Dynamic Walking 2011, Principles and concepts of Legged Locomotion, Friedrich-Schiller University in Jena, Germany, from July 18 to 21 2011

Karguth, A.: Bionische Assistenzrobotik. “Bionik im Betrieb” Auftaktveranstaltung am 30. August 2011 in der IHK Darmstadt, Hessisches Ministerium für Wirtschaft, Verkehr und Landesentwicklung

Veranstaltungen mit materieller und personeller Beteiligung

2007

- Hannovermesse, Beteiligung am *BIOKON*-Gemeinschaftsstand (MPI Stuttgart und TU Ilmenau)
- 31. Deutscher Evangelischer Kirchentag, Köln, Informationsstand der MPG
- Explore Science, naturwissenschaftliche Erlebnistage Mannheim, Veranstaltung der Klaus Tschira Stiftung Gemeinnützige GmbH Heidelberg und des Landesmuseums Mannheim.
- Zuarbeiten (Informationen, Texte, Bildmaterial, Poster, Modelle, Exponate) für die Sonderausstellung „Füße - Auf den Spuren der Evolution“ im Naturkundemuseum Paderborn sowie für den neuen Schwerpunkt „Bionik, Zukunfts-Technik lernt von der Natur“ der Dauerausstellung im Landesmuseum für Technik und Arbeit in Mannheim.
- Girls´ Day im Max-Planck-Institut für Metallforschung
- Informationsstand der MPG auf dem 31. Deutschen Evangelischen Kirchentag, Köln

2008

- Hannovermesse Industrie 2008, Präsentation auf BioKoN-Stand, Kletterroboter und Haftungsstrukturen
- Ausstellung „Prototypen“, Stiftung Brandenburger Tor, Berlin
- Bionikbuch-Projekt, Bertelsmann Verlag
- Unterwelt der Wissenschaften in Jena, Vorstellung der Röntgenanlage und Präsentation der laufenden Arbeiten 07.11.2008
- Vorstellung der Röntgenanlage im Rahmen der Tagung der Deutschen Zoologischen Gesellschaft 19.09.2008
- Ausstellung „Wirtschaft trifft Wissenschaft: Nano bis Makro - angewandte Forschung erfahren und erleben“

- Ausstellung „Wissenschaftszug“ der MPG
- Zuarbeit von Material und Informationen zu Nano-Sonderausstellung im Landesmuseum für Technik in Mannheim

2009

- Experimentalvortrag im Rahmen der Ringvorlesung Bionik an der FH Pforzheim
- Naturwissenschaftlicher Verein Schleswig-Holstein GKSS Teltow der Helmholtz-Gesellschaft, Schwerpunkt Polymeroberflächen
- Workshop des Graduiertenkolleg der Technischen Universität Dresden
- „Wissenschaft trifft Wirtschaft 2009“ an der TU Ilmenau
- „Tag der offenen Tür“ der TU Ilmenau, Mai 2009
- Zuarbeit von Material und Informationen zu Nano-Sonderausstellung im Landesmuseum für Arbeit und Technik in Mannheim, Artikelbeitrag für den Ausstellungsführer
- Beitrag zur Ausstellung im Science Center Medizintechnik am Potsdamer Platz
- Hannovermesse Industrie 2009 (Vordergrund: RatNic, TETRA; Hintergrund: AirArm, Festo AG, unter Beteiligung FG Biomechatronik TU Ilmenau)
- Präsentation im „Science-Express“ des BMBF

2010

- „Die lange Nacht der Technik“ der TU Ilmenau, Unterstützung und Exponatbereitstellung
- Tag der offenen Tür der TU Ilmenau, Unterstützung und Exponatbereitstellung
- Infobus zur Mechatronik-Facharbeiterausbildung im Landkreis Arnstadt-Ilmenau, ab September 2010, Ausstellungsobjekte: RatNic-BG und Skelett-Präparat einer Ratte
- Sonderausstellung: Nano! – Nutzen und Visionen einer neuen Techno-

logie, TECHNOSEUM –Landesmuseum für Technik und Arbeit in Mannheim, 18.3. bis 14. November 2010

- Tiere im Turm, Dauerausstellung im Museum der Natur Gotha, Dezember 2010
- Sigrid Belzer: Die genialsten Erfindungen der Natur: Bionik für Kinder, Verlag Fischer Schatzinsel, 2010
- Jugend filmt Bionik, 7. März - 11. März 2011: Die Klasse 10b des Gymnasiums Ernestinum aus Gotha erstellt unter professioneller Anleitung einen Kurzfilm über das Entwicklungsprojekt InspiRat. Herausgekommen ist ein „Science-Fiction-Thriller“, bei der die aus einem Forschungslabor ausgebrochene Roboterratte RatNic einem Mädchen das Leben rettet. Die Preisverleihung fand am 30.9.2011 im Deutschen Museum in München statt. (<http://www.youtube.com/watch?v=bIIJK3cTgGw> und <http://www.jugendfilmtbionik.de/>)

Projektbeteiligte Wissenschaftler

von A-Z; **fett**: finanziert über das Projekt

- TU Ilmenau, Biomechatronik:
Emanuel Andrada, Kathrin Carl, **Max Fremerey**, **Robert Fetter**,
Thorsten Gramsch, **Wolfgang Kempf**, **Sebastian Köhring**, Stefan
Lutherdt, Omar Jimenez; **Jörg Mämpel**, Cornelius Schilling, Alexander
Spröwitz, **Mike Stubenrauch**, Danja Voges, Hartmut Witte
- FSU Jena, Spezielle Zoologie:
Martin S. Fischer, Bettina Hesse, Cornelia Krause, Laustroer Jonas,
Bettina Hesse, John Nyakatura, **André Schmidt**, Manuela Schmidt
- CAU Kiel:
Loris Al Bitar, Leonid Frantsevich, Dmytro Gladun, Stanislav Gorb,
Marlene Spinner, Michael Varenberg, **Dagmar Voigt**
- TETRA Gesellschaft für Sensorik, Robotik und Automation mbH, Ilmenau:
Stefan Amthor, Andreas Karguth, Peter Schütz, **Christian Trommer**,
Markus Schweitzer

und viele engagierte Studenten.

